

# **ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO DESEMPENHO DE PONTES EXISTENTES**

**Sandra Sofia Correia Saraiva**

(Licenciada em Ciências de Engenharia Civil)

Dissertação para Obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia  
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa,

Orientador:     Doutor Luís Armando Canhoto Neves

**Júri**

Presidente:     Doutor Corneliu Cismaşiu

Vogais: Doutora Laura Caldeira

Doutor Luís Neves

**Janeiro de 2009**



2009 – DEC/FCT/UNL

ANÁLISE PROBABÍLISTICA DO DESEMPENHO DE PONTES EXISTENTES

SANDRA SARAIVA



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, o Professor Luís Neves pela forma como me orientou e ajudou a finalizar esta tese. A sua ajuda foi muito importante. A nota dominante da sua orientação é sem duvida a sua disponibilidade a toda hora, pela qual estou muito grata.

Quero agradecer também aos meus colegas da Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa pelo apoio que me deram ao longo destes 5 anos, em particular a Marisa, Dulce, Sandra entre muitos.

Sou muito grata aos meus pais, às minhas irmãs e restantes familiares, pelo incentivo que recebi ao longo destes últimos anos. E ao meu namorado, Ricardo, pelo apoio que sempre me deu quando as coisas não corriam bem, assim como a Maria João pela sua boa disposição e apoio nos últimos 5 anos.

Obrigada a todos.



## Resumo

Ao longo das últimas décadas foram realizados grandes investimentos na área das infra-estruturas de transportes, de modo a melhorar a qualidade de vida das populações mas também a promover o desenvolvimento económico. Este investimento, em particular em redes rodoviárias, permitiu o desenvolvimento de uma rede bastante completa, onde apenas pequenos ajustamentos serão necessários no futuro. Por outro lado, esta grande rede viária necessita de constante manutenção. Assim sendo é tomar decisões consistentes de modo a minimizar os custos de manutenção e maximizar o nível de segurança e serviço destas estruturas.

Neste trabalho são desenvolvidos modelos de modo a analisar a deterioração ao longo da vida útil de estruturas. O comportamento das estruturas é definido pela condição, assim como pela segurança, considerando o efeito de acções de manutenção e de inspecções. O índice da condição é definido através de inspecções visuais das estruturas, e é complementado pelo índice da segurança que é obtido através de análise estrutural. As incertezas associadas ao efeito da deterioração, aos instantes de aplicação das acções de manutenção, aos efeitos da manutenção na condição e na segurança, bem como aos dados relativos às inspecções realizadas são incluídas definindo todos os parâmetros relevantes como variáveis aleatórias.

De igual modo, analisa-se a ligação entre o índice de segurança e o índice da condição ao considerar que existe interdependência probabilística e relações determinísticas entre os parâmetros que definem os dois índices.

Os indicadores probabilísticos dos índices da condição e da segurança são calculados utilizando o Hipercubo Latino. Os resultados das inspecções são introduzidos no modelo considerando o teorema de Bayes.

Todos os exemplos são reais e são baseados em dados provenientes de estruturas existentes no Reino-Unido e na Holanda.





## ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Gerais .....	1
1.2	Objectivo da dissertação .....	2
1.3	Descrição da Tese.....	2
2	Estado de Arte.....	5
2.1	Sistemas de gestão de pontes.....	5
2.1.1	Modelos de deterioração .....	5
2.1.2	Modelo de Kong e Frangopol.....	6
2.1.3	Modelo de Neves e Frangopol.....	7
2.1.4	Modelo não-linear .....	15
3	Análise do desempenho de estruturas existentes.....	19
3.1	Introdução.....	19
3.2	Análise do desempenho sem acções de manutenção .....	20
3.3	Aplicação de acções de manutenção .....	22
3.3.1	Introdução .....	22
3.3.2	Aplicação cíclica de Silano.....	22
3.3.3	Manutenção baseada no desempenho .....	26
3.3.4	Manutenção baseada no tempo e no desempenho.....	30
3.4	Comparação de diferentes acções de manutenção.....	34
4	Inspecção .....	37
4.1	Generalidades .....	37
4.2	Modelos de actualização.....	38
4.3	Desempenho de estruturas sem manutenção.....	40
4.4	Inspecção alterando o ano da inspecção .....	44
4.5	Inspecção com diferentes qualidades.....	46
4.6	Comparação de diferentes resultados de inspecções .....	49
4.7	Correlação entre a condição e a segurança .....	52
4.8	Realização de duas inspecções.....	55
4.9	Conclusão .....	56

---

5	Inspecção com uma manutenção baseada no tempo .....	59
5.1	Introdução.....	59
5.2	Diferentes anos de inspecção .....	62
5.2.1.1	Ano 10.....	62
5.2.1.2	Ano 50.....	63
5.3	Diferentes qualidades de inspecção .....	66
5.4	Comparação de inspecções.....	68
5.5	Conclusão .....	71
6	Deterioração não linear .....	73
6.1	Introdução.....	73
6.2	Análise do desempenho sem acção de manutenção.....	73
6.3	Inspecção.....	75
6.3.1	Inspecção alterando o ano da inspecção.....	75
6.3.2	Inspecções com diferentes qualidades.....	77
6.3.3	Comparação de inspecções .....	78
6.3.4	Realização de duas inspecções .....	80
6.4	Conclusão .....	81
7	Conclusões e Recomendações.....	83
8	Bibliografia .....	85

Índice das Figuras

Figura 2.1: Evolução no tempo do índice de condição (Neves, 2005) .....	8
Figura 2.2: Evolução no tempo do índice de segurança (Neves, 2005) .....	9
Figura 2.3: Exemplo do índice de condição considerando uma acção de manutenção .....	10
Figura 2.4: Exemplo do índice de segurança considerando uma acção de manutenção .....	11
Figura 2.5: Sobreposição dos efeitos (Neves, 2005) .....	12
Figura 2.6: Índice de condição considerando duas acções de manutenção .....	13
Figura 2.7: Índice de segurança considerando duas acções de manutenção .....	13
Figura 2.8: Oito realizações no espaço bidimensional usando o Hipercubo Latino.....	15
Figura 2.9: Perfil do índice de condição considerando deterioração não-linear .....	16
Figura 3.1: Média e desvio padrão do índice de condição sem manutenção.....	21
Figura 3.2: Média e desvio padrão do índice de segurança sem manutenção.....	21
Figura 3.3: Realização do perfil do índice de condição sob o efeito do Silano .....	24
Figura 3.4: Realização do perfil do índice de segurança sob o efeito do Silano .....	24
Figura 3.5: Média e desvio padrão do índice de condição sob o efeito do Silano.....	25
Figura 3.6: Média e desvio padrão do índice de segurança com uma manutenção baseada no tempo.....	26
Figura 3.7: Indicadores do índice de condição para uma acção baseada no estado .....	28
Figura 3.8: Indicadores do índice de segurança para uma acção baseada no estado .....	28
Figura 3.9: Média e desvio padrão do índice da condição considerando reparação de betão de recobrimento .....	29
Figura 3.10: Média e desvio padrão do índice da segurança com uma manutenção baseada no desempenho .....	30
Figura 3.11: Indicadores do índice da condição para uma acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho .....	32
Figura 3.12: Indicadores do índice da segurança para uma acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho .....	32
Figura 3.13: Média e desvio padrão do índice de condição sob o efeito de protecção catódica .....	33
Figura 3.14: Média e desvio padrão do índice de segurança sob o efeito de protecção catódica .....	34
Figura 3.15: Média e desvio padrão do índice de condição.....	35
Figura 3.16: Média e desvio padrão do índice de segurança.....	35
Figura 4.1: Probabilidade de ocorrência à priori e à posteriori .....	40

Figura 4.2: Média e desvio padrão do índice da condição considerando uma inspecção no ano 20.....	41
Figura 4.3: Média e desvio padrão do índice da segurança considerando uma inspecção no ano 20.....	42
Figura 4.4: Histograma do índice de condição inicial com e sem inspecção .....	43
Figura 4.5: Histograma da taxa de deterioração com e sem inspecção .....	43
Figura 4.6: Comparação da média e desvio padrão do índice de condição para diferentes anos de inspecção.....	44
Figura 4.7: Histograma do índice de condição inicial para diferentes anos .....	45
Figura 4.8: Histograma da taxa de deterioração da condição para anos diferentes .....	46
Figura 4.9: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades de inspecção.....	48
Figura 4.10: Histograma do índice de condição inicial para diferentes qualidades de inspecção.....	48
Figura 4.11: Histograma da taxa de deterioração de condição para diferentes qualidades de inspecção .....	49
Figura 4.12: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	50
Figura 4.13: Histograma do índice de condição inicial para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	51
Figura 4.14: Histograma da taxa de deterioração da condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	52
Figura 4.15: Média e desvio padrão do índice de segurança com correlação entre a condição e a segurança .....	53
Figura 4.16: Histograma do índice de segurança inicial com correlação entre a segurança e a condição .....	54
Figura 4.17: Histograma da taxa de deterioração com correlação entre a segurança e a condição .....	54
Figura 4.18: Média e desvio padrão do índice de condição com duas inspecções.....	56
Figura 5.1: Média e desvio padrão do índice de condição com manutenção baseada no tempo considerando uma inspecção .....	60
Figura 5.2: Histograma do índice de condição com e sem inspecção.....	61
Figura 5.3: Histograma da taxa de deterioração com e sem inspecção .....	61

Figura 5.4: Média e desvio padrão do índice de condição considerando uma inspecção ano 10.....	62
Figura 5.5: Média e desvio padrão do índice de condição considerando uma inspecção ano 50.....	63
Figura 5.6: Histograma do índice de condição sob efeito do Silano para diferentes anos .....	64
Figura 5.7: Histograma da taxa de deterioração sob efeito do Silano para diferentes anos .....	65
Figura 5.8: Histograma da taxa de deterioração sob o efeito do Silano para diferentes anos .....	65
Figura 5.9: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades.....	66
Figura 5.10: Histograma do índice da condição com diferentes qualidades .....	67
Figura 5.11: Histograma da taxa de deterioração da condição com diferentes qualidades .....	68
Figura 5.12: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	69
Figura 5.13: Histograma do índice de condição inicial para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	70
Figura 5.14: Histograma da taxa de deterioração da condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	70
Figura 6.1: Média e desvio padrão do índice de condição sem acção de manutenção.....	74
Figura 6.2: Média e desvio padrão do índice de segurança sem acção de manutenção.....	74
Figura 6.3: Comparação da média e desvio padrão do índice da segurança considerando diferentes instantes de inspecção.....	77
Figura 6.4: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades.....	78
Figura 6.5: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	80
Figura 6.6: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspecção com probabilidade de ser excedido igual a 75%.....	81



Índice das Tabelas

Tabela 2.1: Classificação dos estados de condição em elementos metálicos (adaptado de Thompson, 1993) .....	5
Tabela 3.1: Classificação de condição (Denton, 2002).....	19
Tabela 3.2: Propriedades dos parâmetros associados à condição e segurança sem manutenção .....	20
Tabela 3.3: Efeito da aplicação de Silano nos índices de condição e de segurança .....	23
Tabela 3.4: Efeito da reparação de betão de recobrimento na condição e segurança .....	27
Tabela 3.5: Condição e Segurança com manutenção baseada no estado e no tempo .....	31
Tabela 4.1: Classificação Padrão para elementos de betão armado (Neves 2008) .....	37
Tabela 4.2: Probabilidade de uma leitura errada .....	47
Tabela 4.3: Comparação do índice de condição inicial e taxa de deterioração .....	50
Tabela 6.1: Propriedades dos parâmetros associados à condição e à segurança .....	76
Tabela 6.2: Comparação do índice de condição inicial e taxa de deterioração .....	79









## 1 Introdução

### 1.1 Considerações Gerais

O avanço do conhecimento em termos das propriedades dos materiais, efeito das acções e comportamento das estruturas permitiu, ao longo do século passado, construir estruturas com menores margens de segurança, e consequentemente, menores custos. Hoje em dia, observa-se que essas estruturas têm um tempo de vida mais reduzido que o inicialmente previsto e, essencialmente, muito mais curto do que de estruturas construídas até ao início do século XX. O problema tornou-se aparente nos Estados Unidos após o acidente de Silver Bridge (Lichtenstein, 1993). O colapso desta estrutura deveu-se fundamentalmente à deterioração da estrutura, levando à alterações na legislação que obriga à realização de inspecção periódica. Ainda hoje existem nos Estados Unidos cerca de 150000 pontes que precisam de intervenção a curto prazo (ASCE, 2005). Na Europa, devido a construção massiva de novas estruturas ao longo do último século, verificou-se nas últimas décadas, a necessidade de realizar grandes investimentos na preservação das estruturas existentes.

A experiência recente mostra que a manutenção preventiva reduz significativamente a velocidade de deterioração e os custos a longo prazo, reduzindo a necessidade de acções de manutenção de maior intensidade. Assim, ganha maior importância o planeamento de acções de manutenção ao longo da vida útil de estruturas existentes (Frangopol *et al.*, 2004; Frangopol e Neves, 2003; Kong, 2001; Cruz *et al.*, 2006; Neves, 2008, Das; 1998).

De modo a preservar as pontes existentes com orçamentos sempre limitados, houve a necessidade de desenvolver modelos que permitissem prever e analisar a evolução do desempenho destas, de modo a permitir decisões óptimas a longo prazo.

Vários modelos foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos para auxiliar na tomada de decisões quanto à manutenção de estruturas existentes. Dentro destes, destacam-se dois programas desenvolvidos nos EUA para a gestão de pontes, o Pontis (Thompson, 1993) e o BRIDGIT (Hawk e Small, 1998). As versões Beta de ambos os programas foram apresentadas nos anos 90.

Ambos se baseiam em inspecções e ensaios não destrutivos, classificando cada elemento segundo uma variável discreta da condição. Nenhum dos programas utiliza dados anteriores à última inspecção, considerando apenas informações obtidas nessa inspecção na previsão da deterioração futura.

Ao longo da última década foram apresentados novos modelos para a previsão do desempenho de estruturas existentes, tendo como objectivo o desenvolvimento de melhores sistemas de gestão de estruturas existentes.

Neste trabalho serão analisadas diferentes conjuntos de estruturas existentes com base em diferentes modelos probabilísticos propostos recentemente. Os dados existentes baseiam-se em dados de inspecções visuais realizadas no Reino Unido e na Holanda.

Os modelos utilizados serão combinados com o resultado de inspecções de modo a reduzir a incerteza no desempenho presente e futuro das estruturas. Será assim possível combinar a opinião de peritos com dados concretos das estruturas, obtendo-se melhores previsões, abrindo caminho para melhores decisões.

### 1.2 Objectivo da dissertação

A gestão de redes de estruturas existentes, em particular pontes, depende fortemente da realização de inspecções (de Brito *et al.*, 1997; Phares *et al.*, 2004; Roelfstra *et al.*, 2004; Aktan *et al.*, 1996). As inspecções não estão, no entanto, completamente livres de incerteza e devem ser consideradas num contexto probabilístico. Esta dissertação tem como objectivo a análise do desempenho de estruturas existentes, considerando conjuntamente a opinião de peritos e o resultado de inspecções. Para tal, serão utilizados modelos probabilísticos baseados no teorema de Bayes e os modelos de deterioração nos próximos capítulos.

Com este trabalho pretende-se avaliar a importância da realização de inspecções na previsão do desempenho de estruturas existentes, em particular, a influência do instante de realização, número de inspecções e qualidade da inspecção. Como exemplo serão analisados dois conjuntos de estruturas localizados no Reino Unido e na Holanda.

### 1.3 Descrição da Tese

A tese está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a tese e os seus objectivos.

O segundo capítulo é dedicado ao estado da arte, onde são descritos modelos de deterioração desenvolvidos recentemente, assim como as suas vantagens e desvantagens

No terceiro capítulo são analisados os efeitos de acções de manutenção no desempenho de elementos de betão armado de pontes no Reino-Unido. Os parâmetros que definem o índice da condição e da segurança inicial, assim como as respectivas taxas de deterioração sem manutenção, os efeitos das acções de manutenção e os intervalos de aplicação das acções de manutenção são definidos como variáveis aleatórias dependentes ou independentes.

No quarto capítulo, descrevem-se os efeitos, na previsão de desempenho, da realização de uma inspecção considerando os resultados obtidos no capítulo anterior. Analisa-se o impacto de inspecções realizadas em anos diferentes, com vários níveis de qualidade e considerando ou não correlação entre o índice de segurança e de condição.

No quinto capítulo analisa-se o efeito da realização de inspecção considerando a aplicação de manutenção preventiva. É dedicada especial atenção à informação relativa ao efeito das acções de manutenção obtidas através de inspecção.

No sexto capítulo é apresentado um modelo que considera uma deterioração não-linear do índice de condição e do índice de segurança. É analisado o efeito da realização de uma inspecção com base na deterioração não-linear nos resultados previstos considerando este modelo e os dados relativos à deterioração de tabuleiros de pontes recolhidos na Holanda.

No capítulo sete, são apresentadas conclusões e recomendações.



## 2 Estado de Arte

### 2.1 Sistemas de gestão de pontes

As metodologias de gestão de pontes mais comuns hoje em dia baseiam-se na utilização do resultado de inspecções para a definição do desempenho das estruturas existentes. Os sistemas mais comuns, Pontis (Thompson, 1993) e BRIDGIT (Hawk e Small, 1998), baseiam-se em conceitos fundamentais comuns como sejam:

- Cada ponte é definida como um conjunto de componentes (elementos da ponte, segmentos de elementos, etc. ...);
- É definido um conjunto discreto de estados da condição, definindo a gravidade e extensão dos defeitos encontrados;
- A deterioração da segurança das pontes não é explicitamente considerada (Aktan et al., 1996, Chase e Washer, 1997, Das, 1998, Sommer et al., 1993).

A classificação do estado da condição é feita através da comparação de elementos danificados com uma classificação padrão de cada condição (Roelfstra *et al.*, 2004). Essa classificação é descrita verbalmente, como apresentada na Tabela 2.1, ou então ilustrada através de fotografias e/ou desenhos. Para tomar uma decisão quanto à melhor estratégia de manutenção, é fundamental prever o desenvolvimento da condição num futuro próximo: quer o Pontis (Thompson, 1993) quer o BRIDGIT (Hawk e Small, 1998) modelam a deterioração, como um processo de Markov. Como resultado a condição futura é função apenas da deterioração presente e de um modelo de deterioração independente do tempo.

*Tabela 2.1: Classificação dos estados de condição em elementos metálicos (adaptado de Thompson, 1993)*

Condição	Descrição
Condição 1	Não há nenhum vestígio de corrosão, pintura intacta.
Condição 2	Alguma/nenhuma corrosão, formação de óxido de ferro. A pintura está a decapar começando a mostrar sinais de deterioração.
Condição 3	A pintura deixou de ser eficaz, existe oxidação da superfície e redução da secção.
Condição 4	A pintura não tem qualquer função.
Condição 5	Corrosão reduziu a secção.

#### 2.1.1 Modelos de deterioração

Ao longo da última década, foram desenvolvidos diferentes modelos para estimar o desempenho das pontes existentes, incluindo Kong *et al.* (2001), Kong e Frangopol (2001) e Neves e Frangopol (2005).

Os diferentes modelos relevantes para este trabalho são apresentados nas secções seguintes.

### 2.1.2 Modelo de Kong e Frangopol

O modelo proposto por Kong e Frangopol (2001) define o desempenho de estruturas existentes em termos de um indicador fundamental: o índice de segurança. Os perfis do índice de segurança consideram diversas acções de manutenção que possam ocorrer ao longo da vida útil da estrutura. O modelo assume que, sem manutenção, o índice de segurança se reduz linearmente.

Os dados a introduzir são o índice de segurança inicial, assim como os perfis dos índices de segurança associados à acção de manutenção em questão. Através dos perfis obtém-se o perfil do índice de segurança final.

O perfil de segurança final é obtido através da sobreposição no perfil sem manutenção dos efeitos das acções de manutenção. O efeito de cada acção de manutenção considerada pode ser uma função linear ou não linear.

As vantagens do modelo de Kong e Frangopol são:

- Avaliação do perfil de segurança de uma estrutura ou de um grupo de estruturas considerando uma ou mais acções de manutenção.
- Permite calcular o tempo necessário para a estrutura atingir o valor limite da segurança.
- Considera interacção entre o índice de segurança e os custos associados a uma acção de manutenção.
- Define o instante de aplicação da acção de manutenção usando uma escala de tempo relativa ou absoluta.
- Usa correlações entre as variáveis aleatórias.

No entanto, ao definir o desempenho apenas em função do índice de fiabilidade, não permite incluir a enorme quantidade de informação recolhida nas inspecções realizadas nas últimas décadas.

Para combater algumas das limitações desta metodologia, foi desenvolvido por Neves e Frangopol (2005), um modelo que permite otimizar a manutenção, baseando-se no desempenho da condição e da segurança. As vantagens deste modelo são:

- a condição e a segurança são indicadoras da necessidade de manutenção;
- a deterioração é modelada por funções contínuas;
- considera-se a deterioração e a manutenção (preventiva e correctiva) da estrutura ao longo da sua vida útil.



### 2.1.3 Modelo de Neves e Frangopol

O modelo proposto por Neves e Frangopol (2005) define o desempenho de estruturas existentes em termos de dois indicadores fundamentais. O primeiro, o índice de condição, define o desempenho tal como é observado por um inspetor, em termos de defeitos observáveis e sua extensão. O segundo indicador, o índice de segurança, define o desempenho em termos de uma análise estrutural da segurança, quer seja a partir de uma análise probabilística quer semi-probabilística.

A incerteza na deterioração da condição e da segurança, no efeito das acções de manutenção na condição e na segurança, no tempo de aplicação das acções de manutenção e nos custos de aplicação é considerada explicitamente, considerando todos os parâmetros relevantes como variáveis aleatórias.

Os modelos do índice da condição e do índice da segurança utilizados são baseados nos perfis propostos por Frangopol (1998) que, por sua vez, se baseiam no modelo proposto por Thoft-Christensen (1998). Como se apresenta nas Figuras 2.1 e 2.2, a condição e a segurança da estrutura são considerados constantes durante um período de tempo após a construção, após o qual decrescem linearmente. O intervalo de tempo em que a condição e a segurança são constantes simulam, por exemplo, o intervalo de tempo necessário para os cloretos atingirem as armaduras e se iniciar o processo de corrosão (Thoft-Christensen, 1998). O índice de deterioração da condição e o índice de segurança sem manutenção são dados por:

$$C(t) = \begin{cases} C_o \\ C_o + \alpha_c (t - t_{ic}) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$S(t) = \begin{cases} S_o \\ S_o - \alpha (t - t_i) \end{cases} \quad (2.2)$$

sendo  $C(t)$  e  $S(t)$  os índices da condição e da segurança, respectivamente,  $C_o$  e  $S_o$  a condição inicial e a segurança inicial no instante  $t = 0$ , respectivamente,  $\alpha_c$  a deterioração da condição e  $\alpha$  a deterioração da segurança,  $t_{ic}$  e  $t_i$  instante no qual se inicia a deterioração da condição e da segurança, respectivamente. Nestas expressões assume-se que um índice de condição mais elevado indica uma estrutura mais deteriorada.

O efeito de cada acção de manutenção, que tanto pode ser baseada no tempo ou/e no estado, é modelada através de um ou todos os seguintes efeitos:

- Aumento da condição e/ou segurança após a aplicação da manutenção
- Eliminação da deterioração da condição e/ou da segurança durante um período de tempo.
- Redução da deterioração da condição e/ou da segurança durante um período de tempo.

Os efeitos da manutenção são modelados pelas seguintes variáveis:

- Aumento do índice da condição e segurança após a aplicação, respectivamente  $\gamma_c$  e  $\gamma$ .
- Intervalo durante o qual não há deterioração da condição e da segurança após a aplicação da acção de manutenção,  $t_{dc}$  e  $t_d$ , respectivamente.
- Intervalo durante o qual a deterioração da condição e da segurança é eliminada ou reduzida,  $t_{pdc}$  e  $t_{pd}$ , respectivamente.
- Redução do índice de deterioração da condição e da segurança durante o efeito da acção de manutenção,  $\delta_c$  e  $\delta$ , respectivamente.

O significado de cada uma destas variáveis é apresentado nas Figuras 2.1 e 2.2

Os perfis de condição e da segurança são simulados para cada intervalo de um ano em dois passos:

- Cálculo das taxas de deterioração através da sobreposição dos efeitos de cada acção de manutenção em intervalos de um ano.
- Integração destas taxas de deterioração para obter o índice de condição e de segurança no fim do intervalo.

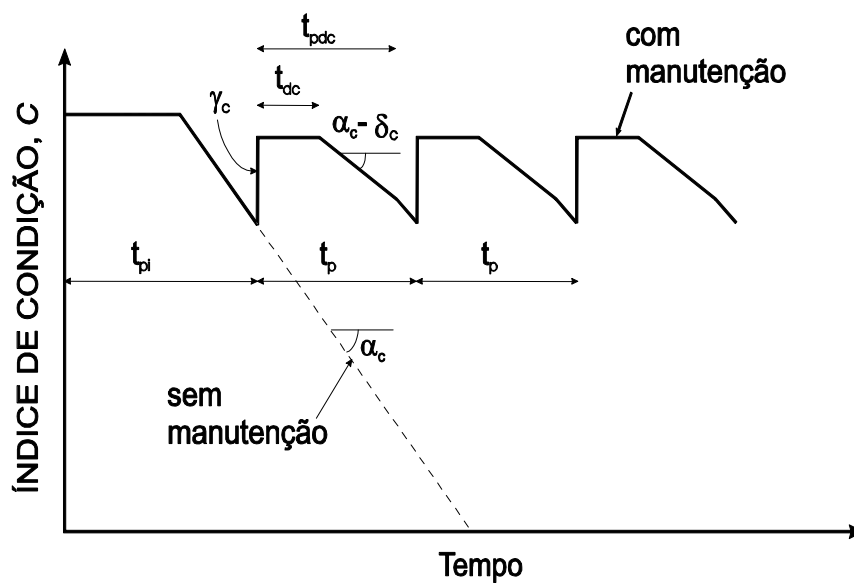


Figura 2.1: Evolução no tempo do índice de condição (Neves, 2005)

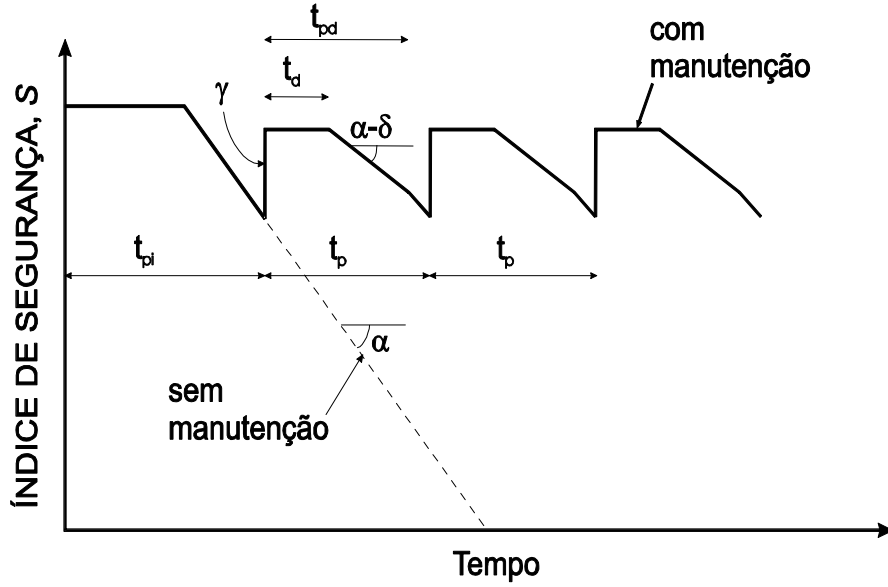


Figura 2.2: Evolução no tempo do índice de segurança (Neves, 2005)

No caso de se realizar apenas uma acção de manutenção, as taxas de deterioração da condição e da segurança após a aplicação da acção de manutenção são, respectivamente:

$$\varepsilon_c = \begin{cases} 0 & \text{se } \tau \leq t_{dc} \\ \alpha_c - \delta_c & \text{se } t_{dc} < \tau \leq t_{pdc} \\ \alpha_c & \text{se } \tau > t_{pdc} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{se } \tau \leq t_d \\ \alpha - \delta & \text{se } t_d < \tau \leq t_{pd} \\ \alpha & \text{se } \tau > t_{pd} \end{cases} \quad (2.4)$$

sendo  $\varepsilon$  e  $\varepsilon_c$  as taxas de deterioração da segurança e da condição considerando o efeito da acção de manutenção, respectivamente,  $\alpha$  e  $\alpha_c$  as taxas de deterioração do índice de segurança e da condição sem acção de manutenção, respectivamente, e  $\tau$  é o intervalo de tempo desde a aplicação da acção de manutenção.

Como exemplo, considere-se uma estrutura caracterizada por um índice de condição inicial de 1.8 e uma taxa de deterioração de 0.03/ano. Aplica-se uma acção de manutenção que tem como efeitos uma melhoria após a acção de manutenção de 0.2, e uma taxa de deterioração após a aplicação da acção de manutenção de 0.008/ano. Os efeitos da acção de manutenção em questão têm uma duração de 10 anos e a acção é aplicada de 15 em 15 anos. No que diz respeito à segurança, esta tem um valor inicial de 1, uma taxa de deterioração de 0.01/ano. A acção de manutenção em questão tem como apenas como efeito uma redução da taxa de deterioração que passa a ser de  $5 \times 10^{-3}$ /ano.

Os índices de condição e segurança obtidos são apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4.

Observa-se na Figura 2.3 que o índice de condição sem manutenção decresce linearmente com o declive correspondente à taxa de deterioração. Observa-se, de igual modo, que o índice da condição com uma acção de manutenção é composto por vários troços, devido à duração dos efeitos da acção de manutenção. Num primeiro troço ocorre uma redução da taxa de deterioração que, após 10 anos, aumenta até ao seu valor inicial, 0.03/ano.

Na Figura 2.4 está representado o índice de segurança. Como se observa, existe uma melhoria no índice de segurança com manutenção em comparação com o índice de segurança sem manutenção. Apesar não haver nenhuma melhoria na segurança no instante de aplicação da acção de manutenção, verifica-se uma menor taxa de deterioração.

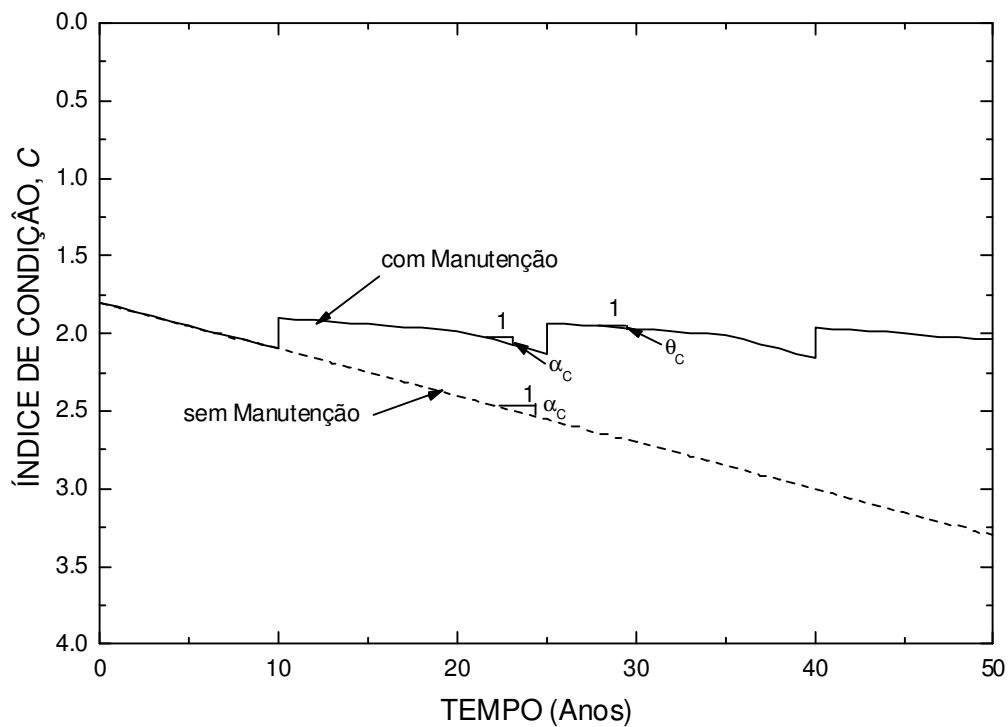


Figura 2.3: Exemplo do índice de condição considerando uma acção de manutenção

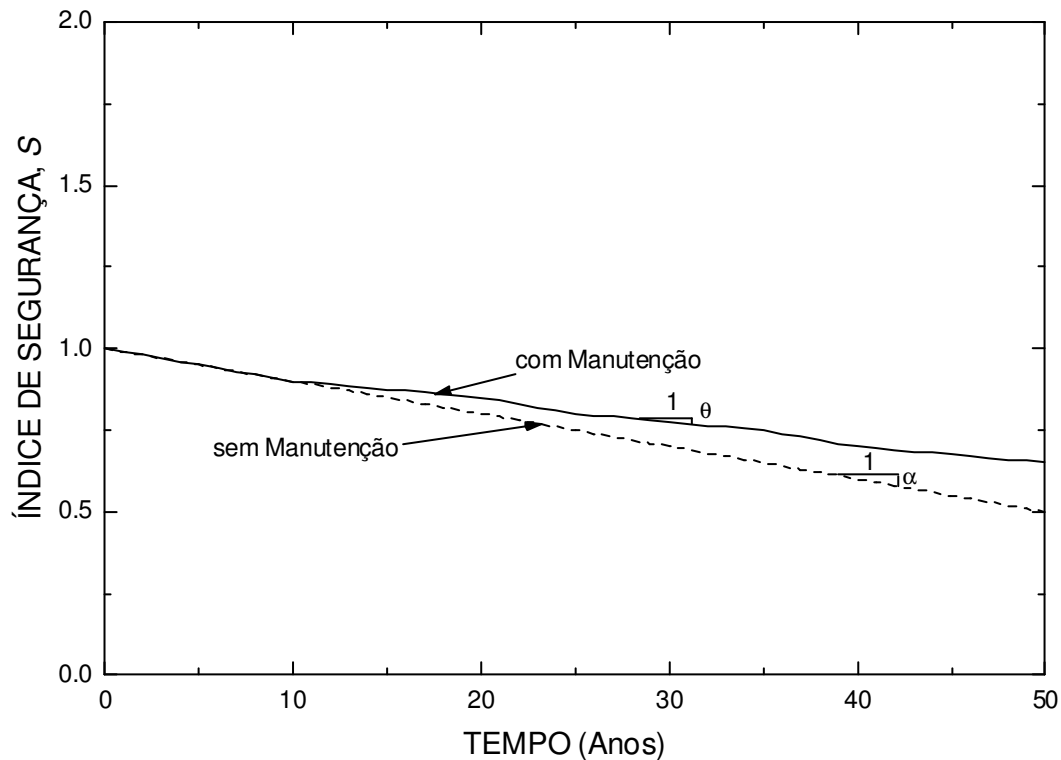


Figura 2.4: Exemplo do índice de segurança considerando uma acção de manutenção

No modelo apresentado por Neves e Frangopol (2005) pode considerar-se a existência de correlação entre o índice de condição e o índice de segurança, nomeadamente entre o valor inicial de ambos os índices, assim como na taxa de deterioração de ambos os índices. A estreita correlação resulta de parâmetros comuns que influenciam ambos os indicadores como sejam o tipo de estrutura, a qualidade da construção, condições ambientais e tráfego (Neves, 2005).

A evolução dos índices de condição e de segurança é obtida considerando a sobreposição de modelos simples, cada um relativo aos desempenhos sem manutenção ou ao efeito de uma acção de manutenção (Figura 2.5).

Considerando a aplicação de duas acções de manutenção, a taxa de deterioração será:

$$\varepsilon = \alpha - \delta_1 - \delta_2 \quad (2.5)$$

sendo  $\varepsilon$  a taxa de deterioração sob o efeito de duas acções de manutenção,  $\delta_1$  e  $\delta_2$  são a redução da taxa de deterioração devido a acção de manutenção 1 e 2, respectivamente. A expressão (2.17) é conservadora

Quando o efeito das acções de manutenção na taxa de deterioração é definido pela taxa de deterioração sob manutenção,  $\theta$ , considera-se apenas o efeito da acção mais eficaz durante cada período, ou seja,  $\theta = \min(\theta_i)$ .

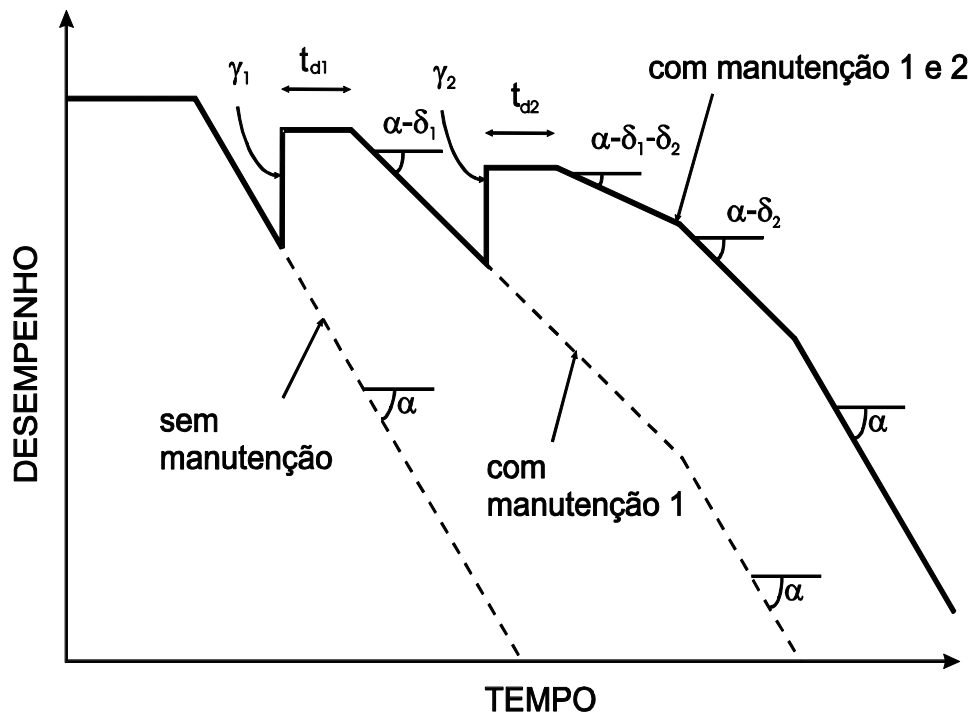


Figura 2.5: Sobreposição dos efeitos (Neves, 2005)

Como exemplo, considere-se a acção de manutenção descrita no exemplo anterior como a acção de manutenção 1. Uma segunda acção de manutenção é aplicada no ano 15 e repetida a cada 18 anos; a taxa de deterioração após a aplicação da acção de manutenção 2 passa a ser de 0.004/ano e há uma melhoria no índice de condição de 0.1. Os efeitos da acção de manutenção 2 têm uma duração de 3 anos. No que diz respeito ao índice de segurança, este passa a ter uma taxa de deterioração de  $2 \times 10^{-3}$ /ano após a aplicação da segunda manutenção. A duração do efeito da acção de manutenção é de 3 anos, como no índice de condição.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 estão representados os indicadores do índice da condição e da segurança, respectivamente. Observa-se na Figura 2.6 que o índice da condição diminui gradualmente ao longo dos anos devido as duas acções de manutenção. Devido à sobreposição das duas acções de manutenção, o índice de condição tem diferentes inclinações assim como diferentes melhorias.

Na Figura 2.7, é visível a sobreposição dos efeitos das duas acções de manutenção. Ao contrário do indicador do índice da condição, não existe nenhuma melhoria na segurança quando são aplicadas as acções de manutenção. Verifica-se que a curva com manutenção tem inclinações diferentes devido ao efeito das duas acções de manutenção.

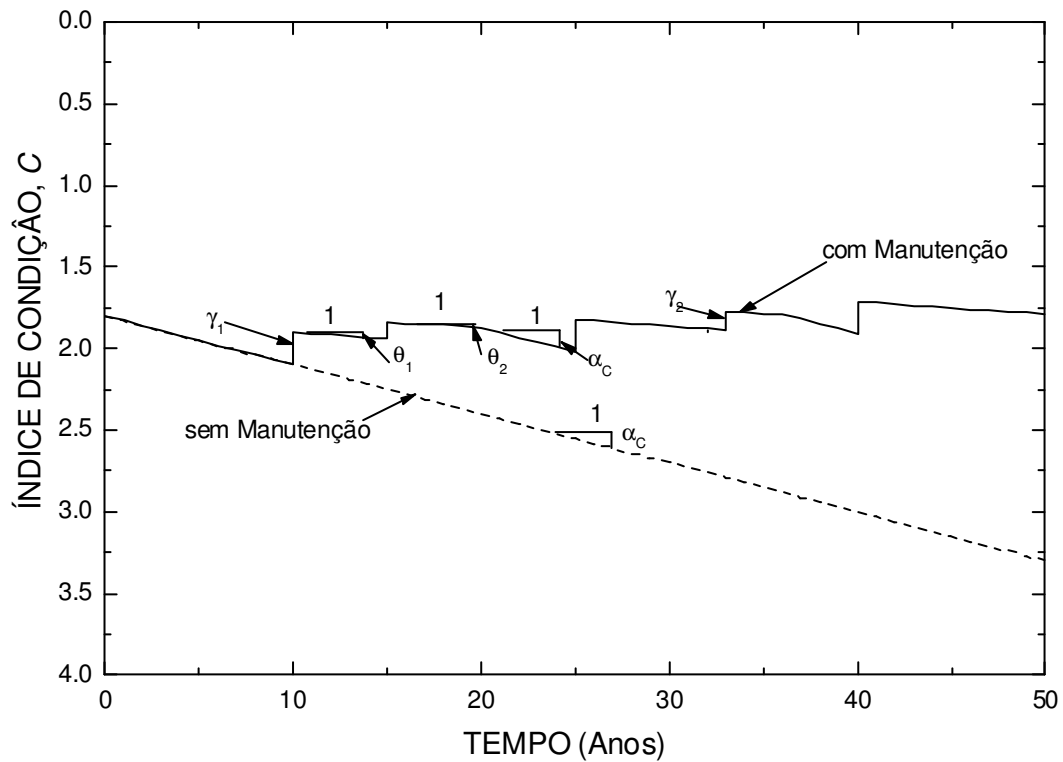


Figura 2.6: Índice de condição considerando duas ações de manutenção

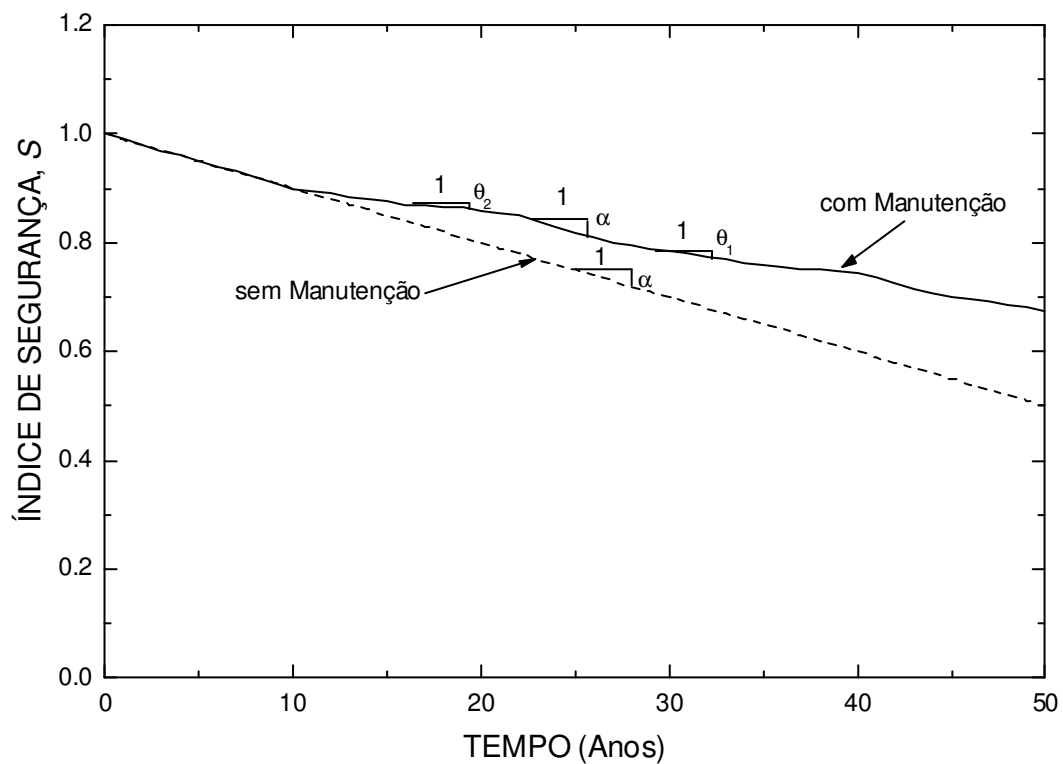


Figura 2.7: Índice de segurança considerando duas ações de manutenção

Tendo em conta a complexidade do modelo, os indicadores probabilísticos de desempenho foram calculados utilizando simulação de Monte-Carlo. A simulação de Monte-Carlo é um

método que permite analisar problemas probabilísticos complexos e que não têm solução analítica. As grandes vantagens da simulação são, entre outras, a sua grande flexibilidade, grau de acessibilidade e simplicidade. A principal desvantagem é a sua enorme morosidade. Para reduzir o custo computacional da simulação é possível utilizar metodologias de redução da variância como sejam a amostragem por Hipercubo Latino. Na amostragem por Hipercubo Latino, o espaço amostral de cada variável é dividido em  $N$  subconjuntos, e um valor é amostrado de cada um destes subconjuntos (McKay *et al.*, 1979; Olsson *et al.*, 2003).

Para gerar a probabilidade da condição e da segurança tem-se o seguinte processo

1. Introdução dos dados iniciais.
2. Gerar as amostras através do Hipercubo Latino.
3. Cálculo dos perfis do índice da condição e da segurança.
4. Cálculo da média, do desvio padrão e dos histogramas.

De acordo com Olsson (2003), no Hipercubo Latino as amostras são geradas criando uma matriz  $\mathbf{P}$  ( $n \times k$ ), em que cada das  $k$  colunas é uma permutação de  $1, \dots, n$ , onde  $n$  é o número de amostras, e  $k$  é o número de variáveis aleatórias, e uma matriz  $\mathbf{R}$  ( $n \times k$ ) composta por número aleatórios independentes, uniformemente distribuídos entre 0 e 1. As amostras correspondem à matriz  $\mathbf{S}$  dada por:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n}(\mathbf{P} - \mathbf{R}) \quad (2.6)$$

Cada elemento de  $\mathbf{S}$  é então transformado na variável aleatória  $X$  com a distribuição de probabilidades pretendida por:

$$x_{ij} = F_{x_j}^{-1}(s_{ij}) \quad (2.7)$$

onde  $F_{x_j}^{-1}$  é a inversa da distribuição de probabilidades da variável aleatória  $j$ .

De modo a exemplificar, considera-se as seguintes matrizes com duas variáveis aleatórias ( $k=2$ ) e 8 amostras ( $n=8$ ):

$$\mathbf{P}^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 1 & 3 & 5 & 7 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} 0.950 & 0.231 & 0.607 & 0.486 & 0.891 & 0.762 & 0.454 & 0.265 \\ 0.123 & 0.632 & 0.891 & 0.478 & 0.215 & 0.921 & 0.365 & 0.721 \end{bmatrix}$$

Utilizando a equação (2.6), obtém-se a matriz  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{S}^T = \begin{bmatrix} 0.006 & 0.221 & 0.299 & 0.439 & 0.514 & 0.655 & 0.818 & 0.967 \\ 0.235 & 0.421 & 0.639 & 0.940 & 0.098 & 0.260 & 0.579 & 0.785 \end{bmatrix}$$



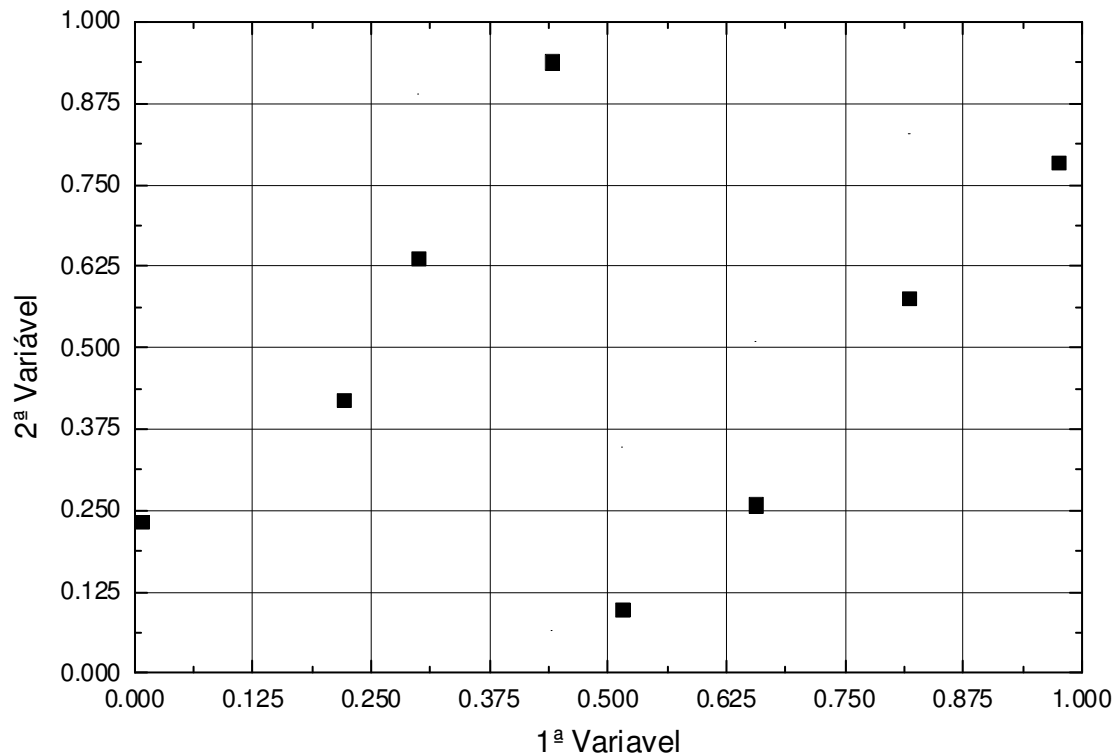


Figura 2.8: Oito realizações no espaço bidimensional usando o Hipercubo Latino

As amostras assim obtidas são representadas na Figura 2.8. Observa-se que cada coluna e cada linha contém apenas uma amostra.

#### 2.1.4 Modelo não-linear

A análise de diferentes estruturas mostrou que em algumas situações a taxa de deterioração não pode ser considerada constante. Em particular, a análise de tabuleiros de pontes na Holanda mostrou que a área fendilhada aumenta de modo parabólico.

Com o objectivo de melhor analisar o comportamento destas estruturas, *Frangopol et al.* (2004) propuseram um modelo de deterioração não linear.

Assim sendo, a deterioração do índice da condição e do índice da segurança sem acção de manutenção são definidas, respectivamente, pelas equações 2.8 e 2.9 (Frangopol e Neves, 2004; Frangopol e Neves, 2006)

$$C(t) = \begin{cases} C_o \\ C_o + A \times (t^2 - t_{ic}^2) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$S(t) = \begin{cases} S_o \\ S_o - B \times (t^2 - t_i^2) \end{cases} \quad (2.9)$$

sendo  $C(t)$  e  $S(t)$  os perfis da condição e da segurança, respectivamente,  $C_o$  e  $S_o$ , a condição inicial e a segurança inicial no instante  $t = 0$ , respectivamente,  $A$  é o índice de deterioração da

condição e B o índice de deterioração da segurança,  $t_{ic}$  e  $t_i$  instante no qual se inicia a deterioração da condição e da segurança, respectivamente.

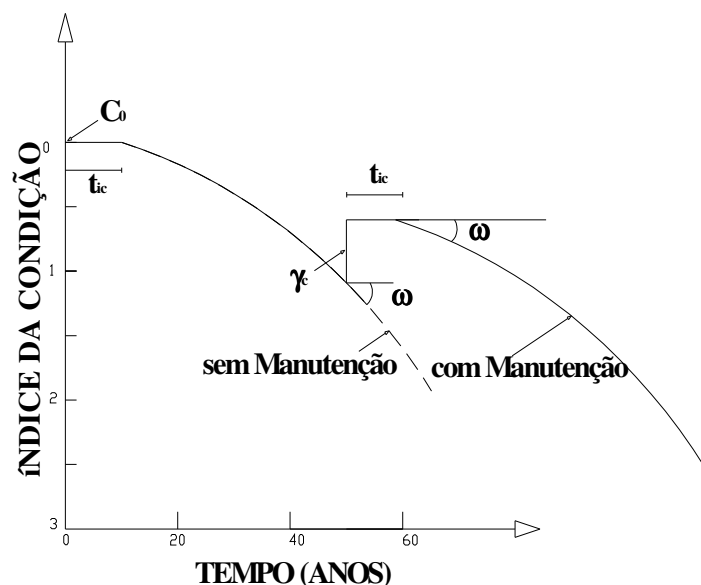


Figura 2.9: Perfil do índice de condição considerando deterioração não-linear

Nas equações 2.8 e 2.9, assume-se que, sem a acção de manutenção, o índice de condição aumenta e o índice de segurança diminui ao longo do tempo.

As acções de manutenção permitem ter um ou mais dos seguintes efeitos:

- Melhoria da condição e/ ou segurança no instante de aplicação.
- Eliminação da deterioração da condição e/ ou segurança durante um intervalo de tempo após a sua aplicação.

Os efeitos assim como as variáveis aleatórias que definem o perfil da condição com e sem acção de manutenção, são apresentados na Figura 2.9, onde  $\omega$  representa a taxa de deterioração da condição.

Todas as variáveis que descrevem os perfis dos índices de condição e de segurança sem acção de manutenção, efeitos das acções de manutenção e intervalos de aplicação são descritos como variáveis determinísticas ou variáveis aleatórias.

Os perfis são calculados considerando intervalos de tempo de um ano e as taxas de deterioração são aproximadas a funções lineares. A taxa de deterioração da condição é modelada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_c = A \times \left\{ (T - \tau_{dc})^2 - (T - 1 - \tau_{dc} + t_{zero}^c)^2 \right\} \quad (2.10)$$

onde  $\tau_{dc}$  é o intervalo de tempo durante o qual é eliminada a deterioração da condição antes de  $T$ ,  $t_{zero}^c$  é a fracção do intervalo de tempo  $[T-1; T]$  durante o qual não ocorre deterioração.

A taxa de deterioração da segurança em intervalos de tempo de um ano é calculada pela seguinte expressão:

$$\mathcal{E} = B \times \left\{ (T - \tau_d)^2 - (T - 1 - \tau_d + t_{zero})^2 \right\} \quad (2.11)$$

onde  $\tau_d$  é o intervalo de tempo durante o qual é eliminada a deterioração da condição antes de  $T$ ,  $t_{zero}$  é a fracção do intervalo de tempo  $[T-1; T]$  durante o qual não ocorre deterioração.

Partindo das taxas de deterioração do índice de segurança e de condição descritas nas equações 2.8 e 2.9, os perfis de condição e de segurança são calculadas por integração.



### 3 Análise do desempenho de estruturas existentes

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo é analisada a deterioração de elementos estruturais de pontes de betão armado considerando a aplicação de três acções de manutenções (uma manutenção cíclica, uma manutenção baseado no desempenho e por fim uma manutenção baseada no desempenho e no tempo) e são analisados os efeitos das manutenções na condição e na segurança das estruturas. As três acções de manutenção serão comparadas com a estrutura em questão sem qualquer manutenção. Esta análise é realizada utilizando o modelo desenvolvido por Neves e Frangopol (2005).

Os dados recolhidos são da autoria de Denton (2002), e são de vários locais do Reino-Unido. Os dados definem o processo de deterioração, em termos probabilísticos, assim como os efeitos das acções de manutenção mencionadas acima.

As pontes de betão armado foram classificadas de acordo com o índice da condição. A classificação é dividida em quatro grupos como se verifica na Tabela 3.1.

*Tabela 3.1: Classificação de condição (Denton, 2002)*

Condição 0	Sem contaminação de cloreto
Condição 1	Contaminação de significativa
Condição 2	Fendilhação visível
Condição 3	Perda de secção

O limite aceitável para o índice de condição é  $C_T = 3$ , e o limite do índice da segurança é de  $S_T = 0.91$ . Os valores limites da condição e da segurança foram descritos na Norma DB 21/01 (2001). A deterioração inicia-se no ano 0.

A análise de todos os exemplos foi realizada para um período de tempo de 50 anos e o número de simulações é de 50000.

### 3.2 Análise do desempenho sem acções de manutenção

Considerando que não são aplicadas acções de manutenção, os índices da condição e da segurança estão definidos por funções bilineares como descrito em Neves e Frangopol (2005).

Considerando os resultados apresentados por Denton (2002), o desempenho sem manutenção é definido pelos parâmetros apresentados na Tabela 3.2. A taxa de deterioração da condição é descrita por uma variável aleatória com distribuição triangular com moda de 0.08/ano, sendo no máximo de 0.16/ano. O índice de condição inicial é, em média, igual a 1.75, mas pode variar entre os valores 0 e 3.50. A taxa de deterioração da segurança é, em moda, 0.015/ano e no máximo de 0.025/ano e o índice de segurança tem moda em 1.50, podendo no entanto ter origem entre o valor 0.91 e 2.50.

Todas as variáveis probabilísticas são definidas por distribuições triangulares, em termos de valores mínimos, modas e máximos.

*Tabela 3.2: Propriedades dos parâmetros associados à condição e segurança sem manutenção*

Índice de Condição			Índice de Segurança		
Índice inicial $C_o$	Início de deterioração $T_{ic}$ (ano)	Taxa de deterioração $\alpha_c$ (ano <sup>-1</sup> )	Índice inicial $S_o$	Início de deterioração $T_i$ (ano)	Taxa de deterioração $\alpha$ (ano <sup>-1</sup> )
0		0	0.91		0
1.75	0	0.08	1.50	0	0.015
3.5		0.16	2.50		0.025

(Nota: As variáveis probabilísticas têm uma distribuição triangular, em termos de mínimo, média e máximo.)

Na Figura 3.1 são apresentados a média e o desvio padrão, assim como os histogramas do índice da condição, considerando que não são aplicadas acções de manutenção. A média da condição cresce linearmente e o desvio padrão cresce parabolicamente, traduzindo uma grande deterioração da estrutura, como se pode observar através do declive da média. O valor médio de condição atinge o limite imposto para a condição,  $C_T = 3$ , no ano 15, como o resultado de uma taxa de deterioração média de 0.08/ano. Observa-se, de igual, modo através dos histogramas que a probabilidade de violar o valor limite da condição,  $C_T=3$ , é significativa desde muito cedo.

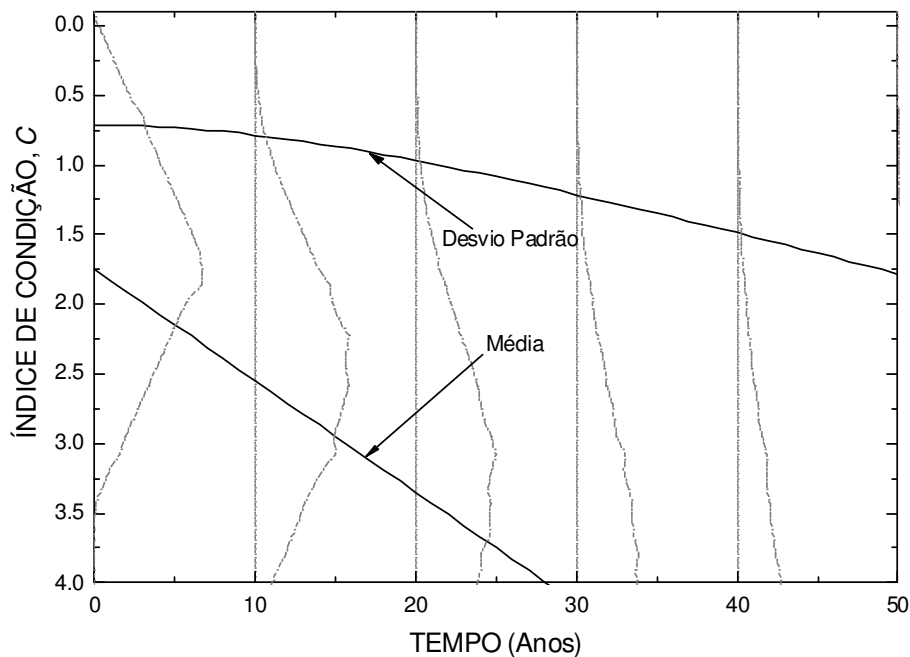


Figura 3.1: Média e desvio padrão do índice de condição sem manutenção

No que diz respeito à segurança, observa-se na Figura 3.2 que a média da segurança decresce linearmente, e o desvio padrão aumenta parabolicamente. No ano 43, o valor médio atinge o limite imposto para a segurança 0.91. O declive da média da segurança é de 0.0167/ano.

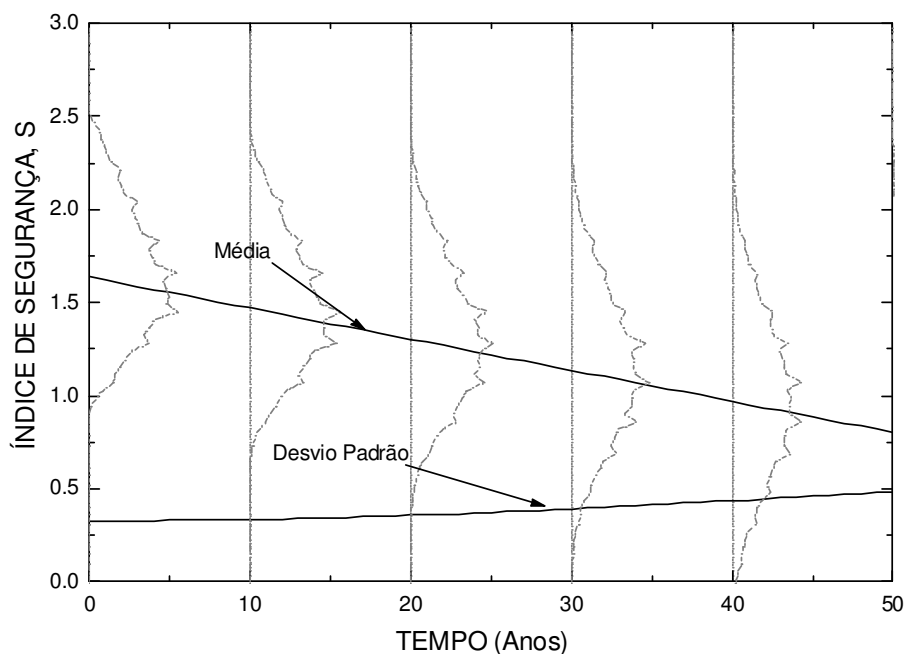


Figura 3.2: Média e desvio padrão do índice de segurança sem manutenção

Verifica-se assim que o estado da condição atinge os valores limite definidos muito mais cedo que a segurança, demonstrando uma maior deterioração do índice de qualidade, como se pode observar pelo declive das respectivas médias.

## 3.3 Aplicação de acções de manutenção

### 3.3.1 Introdução

As acções de manutenção têm inúmeras classificações possíveis, incluindo a amplitude dos efeitos, os custos ou a definição do instante de aplicação. No modelo apresentado por Neves e Frangopol (2005), as acções de manutenção são definidas como:

- i. baseadas no tempo
- ii. baseadas no desempenho
- iii. baseadas no tempo e no desempenho.

Numa acção de manutenção baseada no tempo, o instante de aplicação da manutenção é definido por dois valores determinísticos ou aleatórios: o instante de primeira aplicação  $t_i$  e o intervalo entre aplicações, independentes do desempenho.

Uma acção de manutenção baseada no desempenho é aplicada quando é atingido um valor limite da condição ou da segurança, ou ambos.

Numa acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho, a aplicação da primeira manutenção é definida por uma variável do desempenho e as manutenções seguintes são definidas por variáveis aleatórias independentes do desempenho.

As acções de manutenção podem ser classificadas como essenciais ou preventivas. Uma acção de manutenção essencial é, em regra, uma acção baseada no desempenho, visto ser aplicada quando se atinge um valor limite da condição ou da segurança. Nestas acções de manutenção verifica-se uma melhoria imediata na condição ou na segurança. Uma acção de manutenção preventiva é em regra baseada no tempo, e em geral, apenas atrasa ou reduz a deterioração, não ocorrendo melhoria no desempenho.

### 3.3.2 Aplicação cíclica de Silano

Neste exemplo analisa-se a aplicação de uma manutenção preventiva ao longo do tempo, que afecta tanto a condição como a segurança (Tabela 3.3). A manutenção considerada é a aplicação de Silano, que reduz a penetração de cloretos, e consequentemente, reduz a deterioração da condição e da segurança. No entanto, é preciso salientar que esta acção de manutenção não corrige os defeitos já existentes, já que não há substituição de elementos deteriorados, e não há nenhuma melhoria do desempenho.

Como se pode verificar na Tabela 3.3, a primeira manutenção é aplicada segundo uma distribuição triangular, com moda 2.5 anos, e o seu efeito tem, em média, a duração de 7.5 anos. As manutenções seguintes são aplicadas em média a cada 3.5 anos após a primeira manutenção, ou seja, antes do fim do efeito da aplicação anterior. Assim, o efeito da acção de manutenção é eficaz durante grande parte da vida útil. A aplicação desta manutenção não vai melhorar a condição ou a segurança no instante de aplicação ( $\gamma_c = \gamma = 0$ ). A deterioração da condição decresce, em moda, para 0.01/ano, sendo o máximo 0.03/ano. Assim, observa-se uma redução da taxa de deterioração da condição para 12.5% e uma redução da taxa de



deterioração da segurança para 46.6%. Na realidade, verifica-se que, a partir da primeira aplicação de Silano, a média da taxa de deterioração da condição é igual à definida considerando que o efeito da acção de manutenção está activo.

*Tabela 3.3: Efeito da aplicação de Silano nos índices de condição e de segurança*

SILANO				
Aplicação da 1ª manutenção (ano)		0	2.5	5
Manutenções seguintes (ano)		1	3.5	6
Condição	Melhoria $\gamma_c$	0		
	Adiamento da deterioração $T_{dc}$ (ano)	0		
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta_c$ (ano <sup>-1</sup> )	0	0.01	0.03
	Duração do efeito da manutenção $T_{pdc}$ (ano)	7.5	10	12.5
Segurança	Melhoria $\gamma$	0		
	Adiamento da deterioração $T_d$ (ano)	0		
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta$ (ano <sup>-1</sup> )	0	0.007	0.018
	Duração do efeito da manutenção $T_{pd}$ (ano)	7.5	10	12.5

Nas Figuras 3.3 e 3.4 é apresentada a evolução dos índices de condição e de segurança, respectivamente, considerando que todos os parâmetros tomam o seu valor médio.

Os resultados obtidos, considerando esta acção de manutenção são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6 para o índice da condição e o índice da segurança, respectivamente.

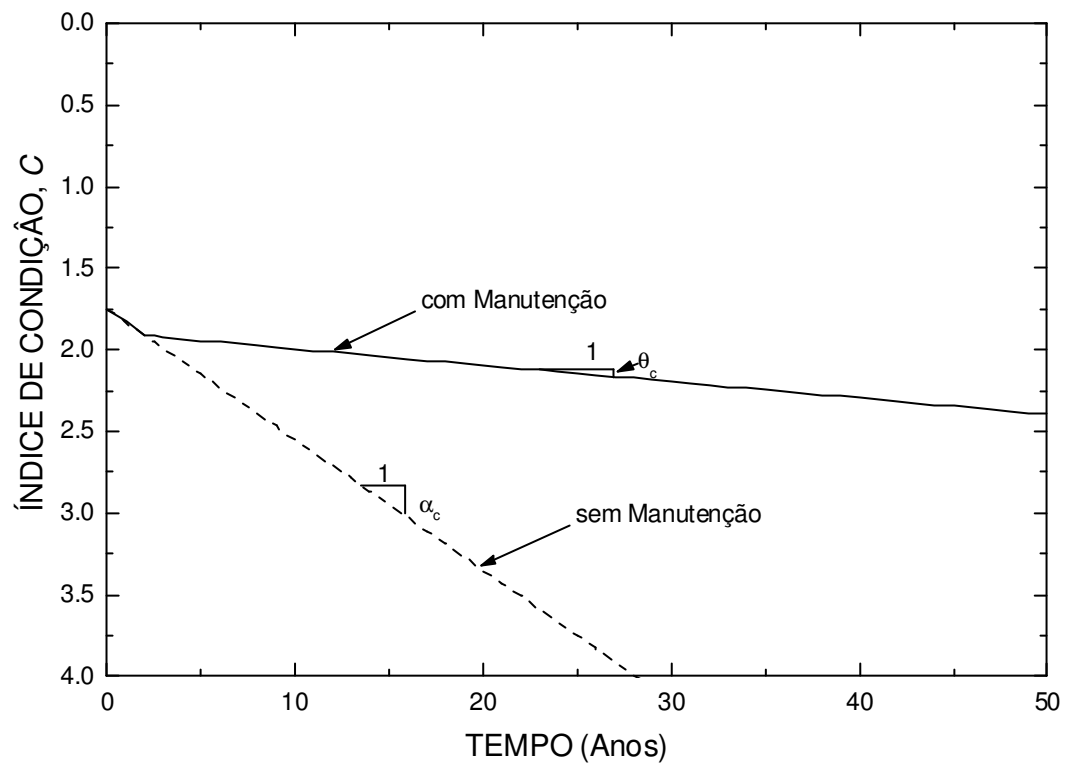


Figura 3.3: Realização do perfil do índice de condição sob o efeito do Silano

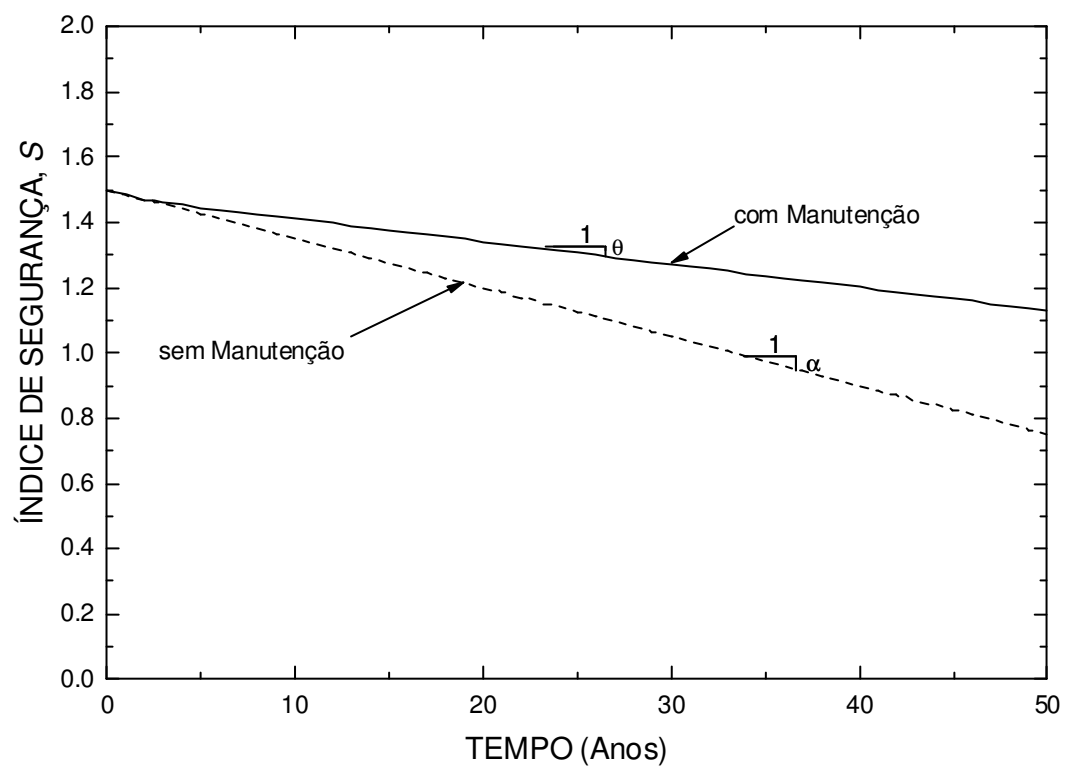


Figura 3.4: Realização do perfil do índice de segurança sob o efeito do Silano

Na Figura 3.5, observa-se que no caso da condição tanto a média como o desvio padrão melhoram significativamente em comparação com os resultados obtidos sem qualquer manutenção. A média e o desvio padrão têm a mesma origem nos dois casos, mas verifica-se que existe uma melhoria a partir do ano 2.5, traduzindo a aplicação da primeira manutenção. O desvio padrão é muito inferior ao desvio padrão sem manutenção e quase constante, e a média tem uma inclinação de 0.01, muito próximo da moda da taxa de deterioração sob o efeito do Silano. Como se pode verificar, a condição média nunca ultrapassa o valor limite da condição  $C_T=3$  e o desvio padrão é inferior a 1.

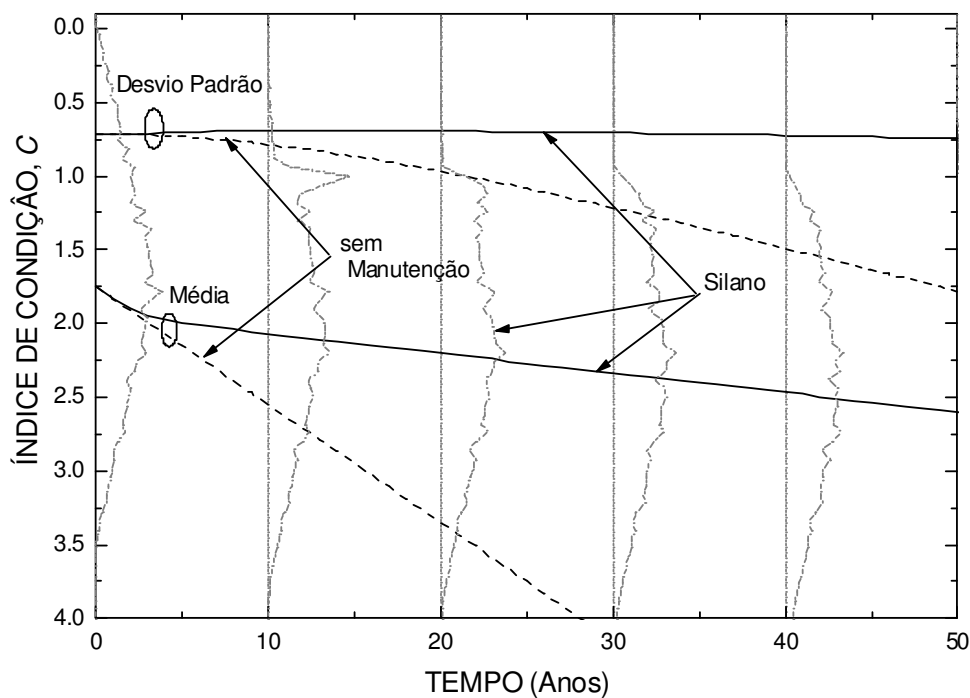


Figura 3.5: Média e desvio padrão do índice de condição sob o efeito do Silano

Quanto à segurança, as diferenças observadas são mais pequenas que as obtidas para o índice da condição. A origem de ambas as médias é a mesma tendo em conta que a primeira manutenção é aplicada no ano 2.5. O declive da média é reduzido, como no caso da condição, sendo a taxa de redução de 0.007/ano enquanto sem acção de manutenção é igual a 0.0167/ano. Como sucede na condição, a partir do ano 2.5 as médias apresentam diferenças significativas, traduzindo o efeito da manutenção. O desvio padrão da segurança com manutenção é inferior ao desvio padrão sem manutenção.

Tendo em conta que a acção de manutenção não considera nenhuma melhoria nem um adiamento da deterioração, a melhoria da segurança e da condição resulta numa menor taxa de deterioração dos respectivos índices. De facto, o efeito da acção de manutenção tem uma duração de 7.5 anos enquanto que as acções de manutenção são aplicadas de 3.5 anos. Como resultado, a estrutura estará sob o efeito do Silano durante grande parte da vida útil e,

como tal, a taxa média de deterioração da condição e da segurança corresponde à apresentada na Tabela 3.2.

Na Figura 3.5, observa-se nos histogramas que a probabilidade de ocorrência do valor limite da condição  $C_T=3$  do Silano é inferior a probabilidade de ocorrência sem acção de manutenção. No que diz respeito aos histogramas do índice de segurança observa-se na Figura 3.6 que a probabilidade de ocorrência do valor limite da segurança  $S_T=0.91$  é inferior à probabilidade de ocorrência sem acção de manutenção.

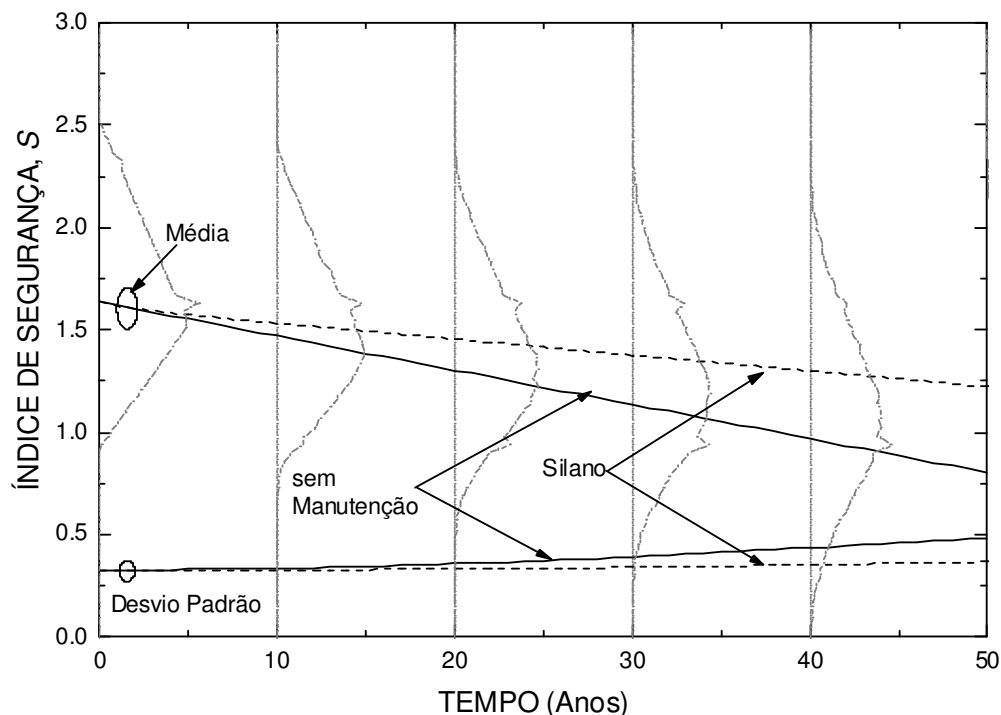


Figura 3.6: Média e desvio padrão do índice de segurança com uma manutenção baseada no tempo

#### 3.3.3 Manutenção baseada no desempenho

Uma manutenção baseada no desempenho é aplicada cada vez que o valor limite da condição e/ou da segurança é atingido. Estas são acções de maior amplitude, e que são aplicadas com o objectivo de corrigir defeitos existentes.

A acção de manutenção considerada é a reparação do betão de recobrimento. Assim, considera-se que a camada de betão contaminado por cloretos é substituída. Os defeitos visíveis são corrigidos e consequentemente existe uma melhoria da condição, mas nenhuma melhoria da segurança.

No seguinte exemplo aplica-se uma manutenção cada vez que o índice da condição atinge o valor limite  $C_T=3$ . As aplicações seguintes da acção de manutenção ocorrem quando o valor limite do índice da condição voltar a ser atingido.

A melhoria da condição tem uma distribuição triangular, com mínimo 2, moda 2.5 e máximo 3, e não há nenhuma melhoria na segurança imediatamente após a aplicação da acção de manutenção. Em relação ao índice da segurança, a taxa de deterioração do índice da segurança é adiada enquanto o índice da condição for inferior a 1.

Tabela 3.4: Efeito da reparação de betão de recobrimento na condição e segurança

Reparação do Betão de recobrimento (RB)				
Aplicação da 1ª manutenção		$C = 3$		
Manutenções seguintes		$C = 3$		
Condição	Melhoria $\gamma_c$	2.0	2.5	3.0
	Adiamento da deterioração $T_{dc}$ (ano)	0		
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta_c$ (ano <sup>-1</sup> )	-		
	Duração do efeito da manutenção $T_{pdc}$ (ano)	0		
Segurança	Melhoria $\gamma$	0		
	Adiamento da deterioração $T_d$	enquanto $C < 1$		
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta$ (ano <sup>-1</sup> )	-		
	Duração do efeito da manutenção $T_{pd}$	enquanto $C < 1$		

Na Figura 3.7 e 3.8 estão representados os indicadores do índice da condição e da segurança, respectivamente, assumindo que todas as variáveis são descritas pela sua média. Na Figura 3.7, verifica-se que a condição tem a mesma taxa de deterioração ao longo da vida da estrutura. A diferença observada, em comparação com índice de condição sem manutenção, é a melhoria que acontece cada vez que o índice da condição atinge o valor limite,  $C_T = 3$ . Na Figura 3.8, é apresentado o índice de segurança e observa-se que este é constante quando o índice de condição é inferior a 1.

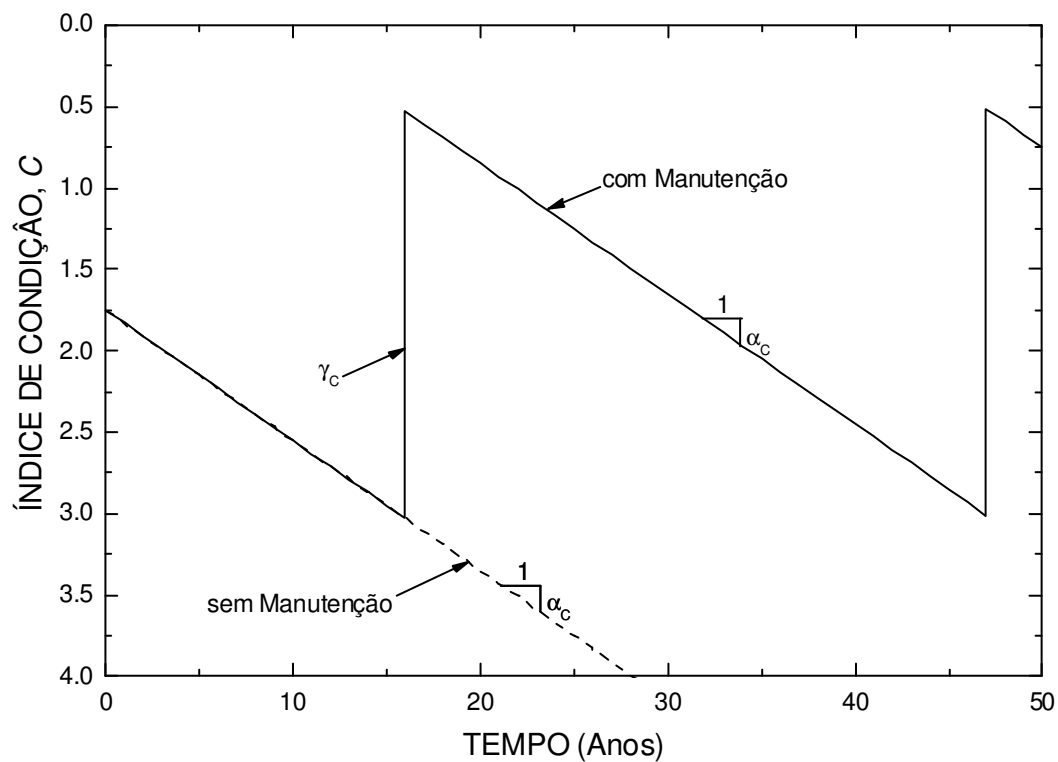


Figura 3.7: Indicadores do índice de condição para uma acção baseada no estado

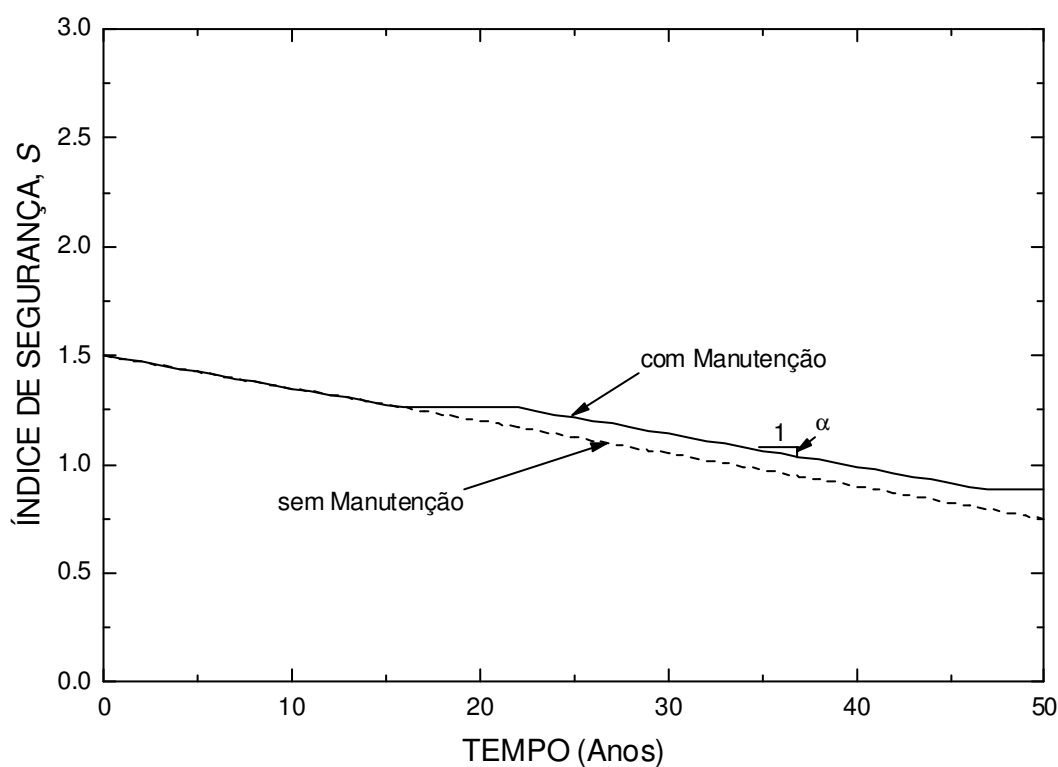


Figura 3.8: Indicadores do índice de segurança para uma acção baseada no estado

Na Figura 3.9 é apresentada a média, desvio padrão e histogramas do índice da condição considerando a reparação do betão de recobrimento. Observa-se que as origens da média do índice da condição com manutenção e sem manutenção são diferentes, sendo a origem da média com manutenção de 1.64, e sem manutenção 1.75. As origens diferentes devem-se ao facto de algumas das estruturas em análise, já terem atingido o valor limite da condição,  $C_T=3$ , e necessitarem de uma manutenção no ano  $t=0$ . Além disso, observa-se que a média com manutenção é aproximadamente constante ao longo do tempo. Considerando que a manutenção é aplicada quando a condição atinge o valor limite da condição  $C_T=3$ , a probabilidade da aplicação ser superior a 3.0 é nula durante toda a vida da estrutura. Quanto ao desvio padrão, este também tem origens diferentes nos dois casos, sendo respectivamente com manutenção e sem manutenção de 0.69 e 0.71. O desvio padrão, tal como a média, é aproximadamente constante ao longo dos 50 anos e nunca superior a 0.75.

Os histogramas do índice da condição têm uma distribuição homogénea ao longo dos anos, demonstrando uma probabilidade nula do valor limite da condição ser ultrapassado.

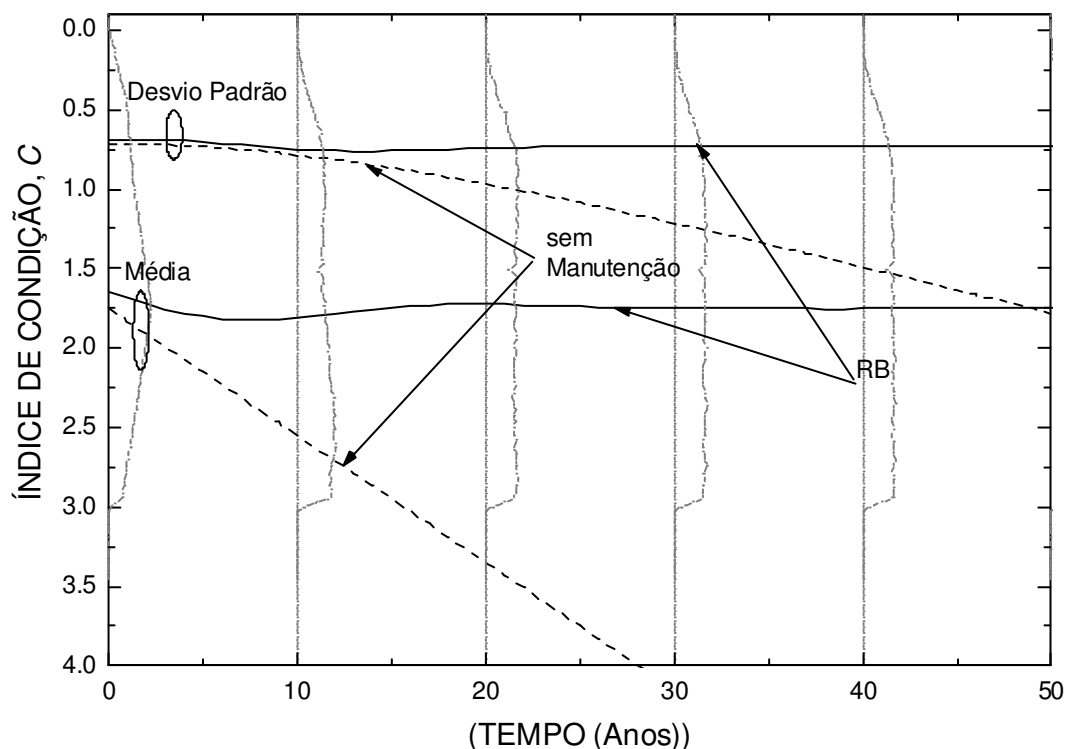


Figura 3.9: Média e desvio padrão do índice da condição considerando reparação de betão de recobrimento

No que diz respeito à segurança a diferença entre os perfis com e sem manutenção é relativamente pequena. A acção de manutenção não melhora o índice de segurança, mas apenas adia a deterioração. Assim sendo a inclinação da média do índice de segurança com manutenção (0.013/ano), é inferior em relação a inclinação da média sem acção de manutenção, (0.0167/ano).

O índice de segurança médio não atinge o valor limite de segurança,  $S_T=0.91$ . O valor limite da segurança tem de igual modo reduzida probabilidade de ser ultrapassado como se pode observar nos histogramas na Figura 3.10.

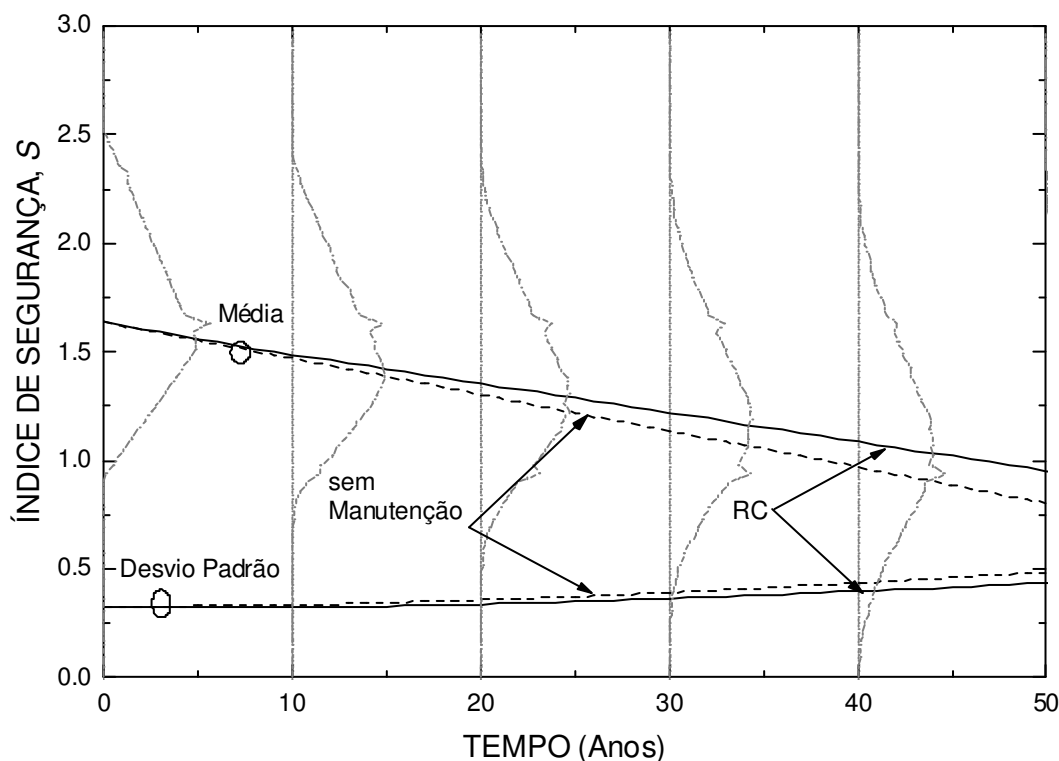


Figura 3.10: Média e desvio padrão do índice da segurança com uma manutenção baseada no desempenho

#### 3.3.4 Manutenção baseada no tempo e no desempenho

Uma manutenção baseada no tempo e no estado é caracterizada por uma variável de desempenho, para determinar em que instante é aplicada a primeira manutenção. No entanto, o intervalo das manutenções seguintes é determinado por variáveis independentes do desempenho. A aplicação de uma manutenção baseada no tempo e no estado é definida por uma variável que determina se é o valor limite da segurança ou da condição que define a primeira aplicação, e três variáveis aleatórias: valor limite da condição, valor limite da segurança e intervalo entre as manutenções.

No exemplo é ilustrado o efeito de uma manutenção baseada no tempo e no desempenho, como seja a aplicação de uma protecção catódica. Esta acção de manutenção consiste em controlar a corrosão através da colocação de um metal muito mais oxidável junto as armaduras. É promovido um contacto electrólito entre o metal a proteger e outro, menos nobre, que passa a actuar como ânodo, sendo substituído periodicamente. Este metal é sacrificado, pelo estabelecimento de uma célula artificial em que o metal a proteger actua como cátodo.



Nesta manutenção não há substituição de elementos da estrutura, e portanto não existe melhoria quer da condição quer da segurança, mas a deterioração da condição e segurança são retardadas. A primeira manutenção é efectuada quando a condição atinge o valor limite 2. As manutenções seguintes são aplicadas em intervalos definidos por uma distribuição triangular  $T(7.5;10;12.5)$ . A deterioração da condição e da segurança são adiadas durante 12.5 anos. Assim sendo, após a primeira aplicação, a deterioração é suspensa durante o resto da vida útil da estrutura.

Tabela 3.5: Condição e Segurança com manutenção baseada no estado e no tempo

Protecção Catódica (PC)				
Aplicação da 1ª manutenção $T_{pi}$			$C = 2$	
Manutenções seguintes $T_p$			7.5	10 12.5
Condição	Melhoria $\gamma_c$		0	
	Adiamento da deterioração $T_{dc} (ano)$		12.5	
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta_c (ano^{-1})$		-	
	Duração do efeito da manutenção $T_{pdc} (ano)$		-	
Segurança	Melhoria $\gamma$		0	
	Adiamento da deterioração $T_d (ano)$		12.5	
	Taxa de deterioração após a manutenção $\theta (ano^{-1})$		-	
	Duração do efeito da manutenção $T_{pd} (ano)$		-	

Na Figura 3.11 e 3.12 estão representados os indicadores do índice da condição e da segurança, respectivamente, considerando as médias dos valores definidos na Tabela 3.5. Verifica-se que uma vez atingido o valor limite da condição, a deterioração é suprimida durante o resto da vida útil.

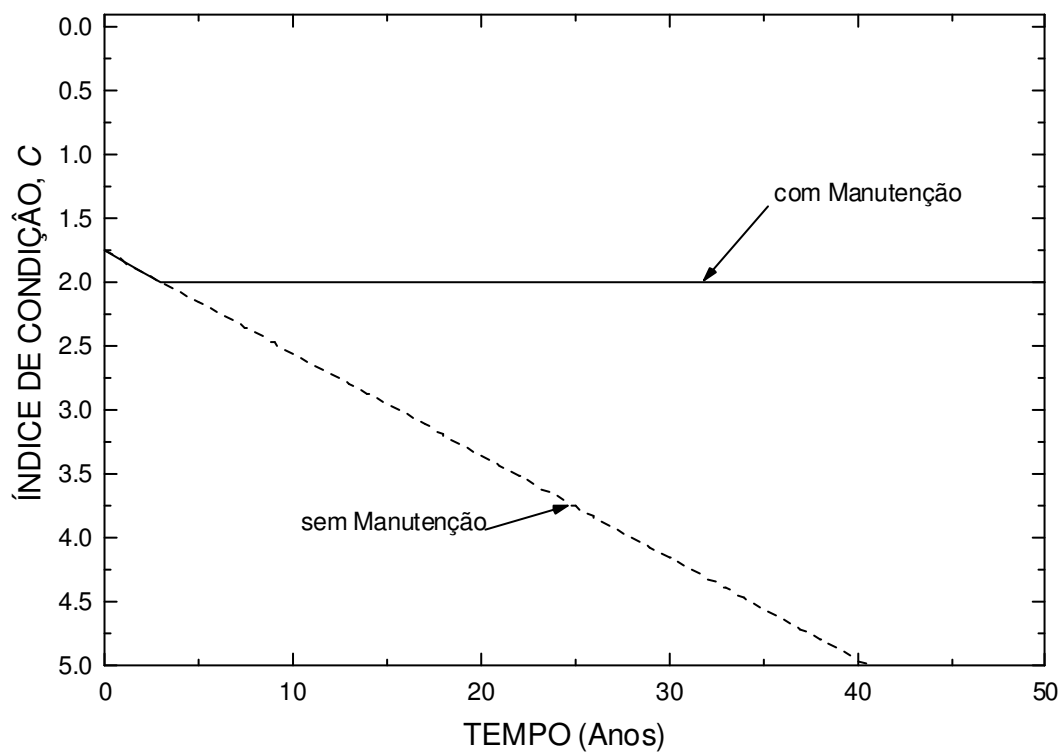


Figura 3.11: Indicadores do índice da condição para uma acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho

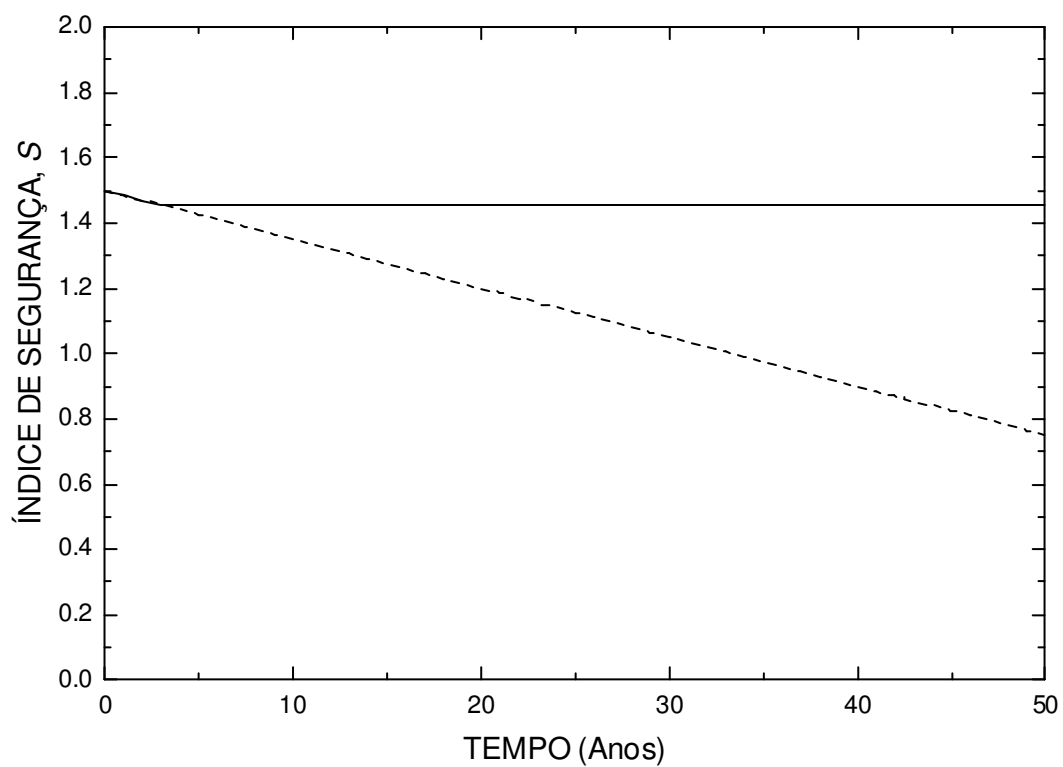


Figura 3.12: Indicadores do índice da segurança para uma acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho

Na Figura 3.13, observa-se uma melhoria considerável do índice da condição, tanto em termos de média como de desvio padrão. Ambas as médias têm a mesma origem, isto é não houve nenhum efeito de acções de manutenção no ano 0. A partir do ano 0, a curva da média com manutenção distancia-se da média sem manutenção, cresce até ao ano 10, sendo constante nos anos seguintes e nunca superior a 2. A média do índice da condição sem manutenção atinge o valor limite da condição,  $C_T=2$ , no ano 4. Nesse mesmo ano, o valor da média com manutenção é de 1.92. Quanto ao desvio padrão, de igual modo, se observa que o desvio padrão com manutenção decresce parabolicamente ao longo dos 50 anos. Na realidade, quando uma estrutura atinge o valor  $C=2$ , passa a ter um índice de condição constante. Assim, o valor limite médio tende para 2.0, enquanto o desvio padrão tende para zero.

No que diz respeito à segurança, os efeitos da acção de manutenção não são tão grandes como para o índice de condição. A média da segurança decresce parabolicamente, e não é inferior a 1.5. Quanto ao desvio padrão, este é menor do que o desvio padrão sem manutenção e é constante ao longo dos 50 anos com valor de 0.40. Os histogramas são uniformes e a probabilidade da segurança atingir os valores abaixo do limite definido de 0.91, é muito baixo.

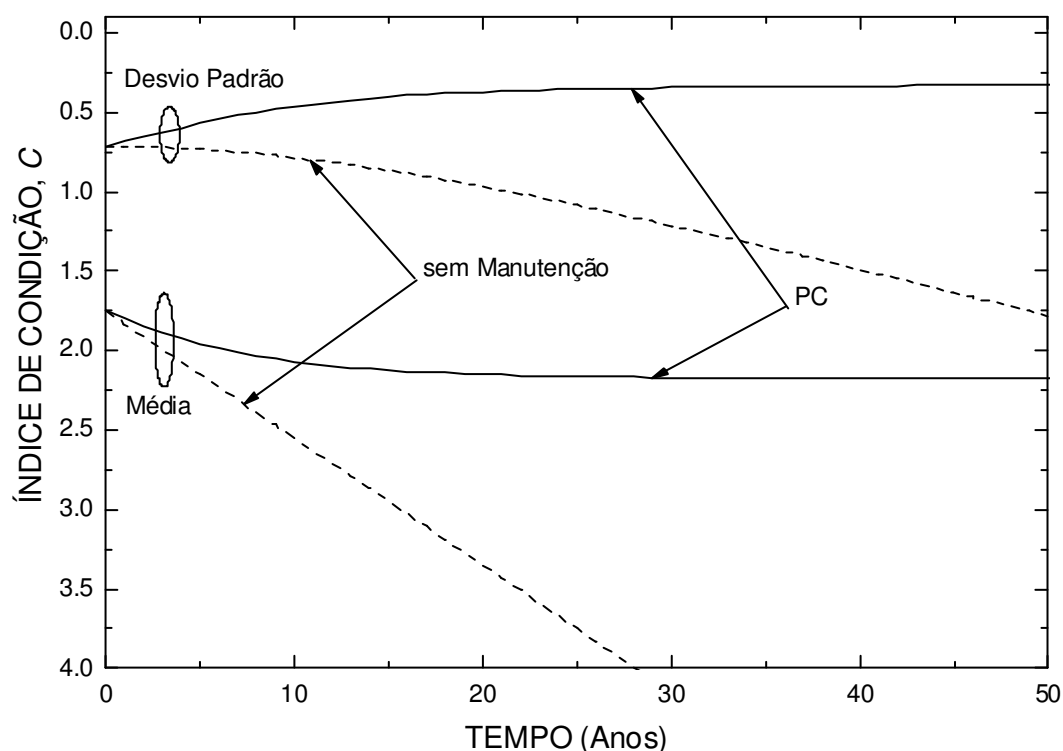


Figura 3.13: Média e desvio padrão do índice de condição sob o efeito de protecção catódica

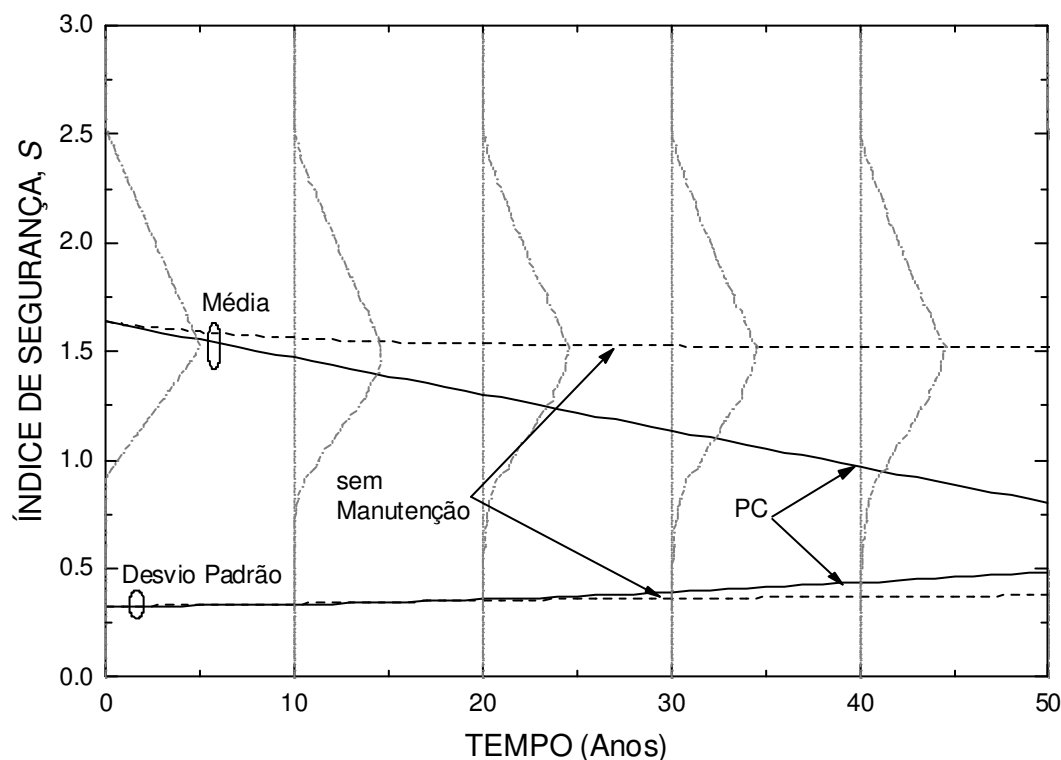


Figura 3.14: Média e desvio padrão do índice de segurança sob o efeito de protecção catódica

Os efeitos da acção de manutenção em estudo são mais significativos no índice da condição que no índice da segurança. De facto, a acção de manutenção é dependente da condição, visto ser aplicada quando o valor limite é 2, e verifica-se a eliminação da deterioração.

### 3.4 Comparação de diferentes acções de manutenção

Os exemplos apresentados mostram que uma acção de manutenção pode afectar apenas a condição ou apenas a segurança, ou ambas, dependendo do tipo de manutenção aplicada. No que diz respeito à condição, a acção de manutenção com maior impacto é, em termos comparativos, a reparação do betão, por apresentar melhor média e desvio padrão (Figura 3.15). Tendo em conta que a reparação do betão implica a substituição apenas do betão contaminado, sem substituição de armaduras corroídas, a melhoria é significativa apenas no índice de condição.

A acção de manutenção que tem maior impacto na segurança é a aplicação de protecção catódica (Figura 3.16). Esta acção é uma manutenção que afecta tanto o índice de condição como o índice da segurança, visto resultar na redução da penetração do cloreto, e consequentemente na redução da corrosão.

Os resultados apresentados mostram que a mesma acção de manutenção pode ter efeitos substancialmente diferentes no índice de condição e no índice de segurança. Efectivamente, algumas acções apenas corrigem efeitos visíveis, sem significativas alterações na segurança da estrutura. Esta conclusão é particularmente relevante se se considerar que,

correntemente, as decisões de manutenção são tomadas considerando apenas o índice de condição, e que, conseqüentemente, podemos estar a convergir para que embora conduzindo a estruturas sem defeitos exteriores, podem resultar reduções importantes da segurança.

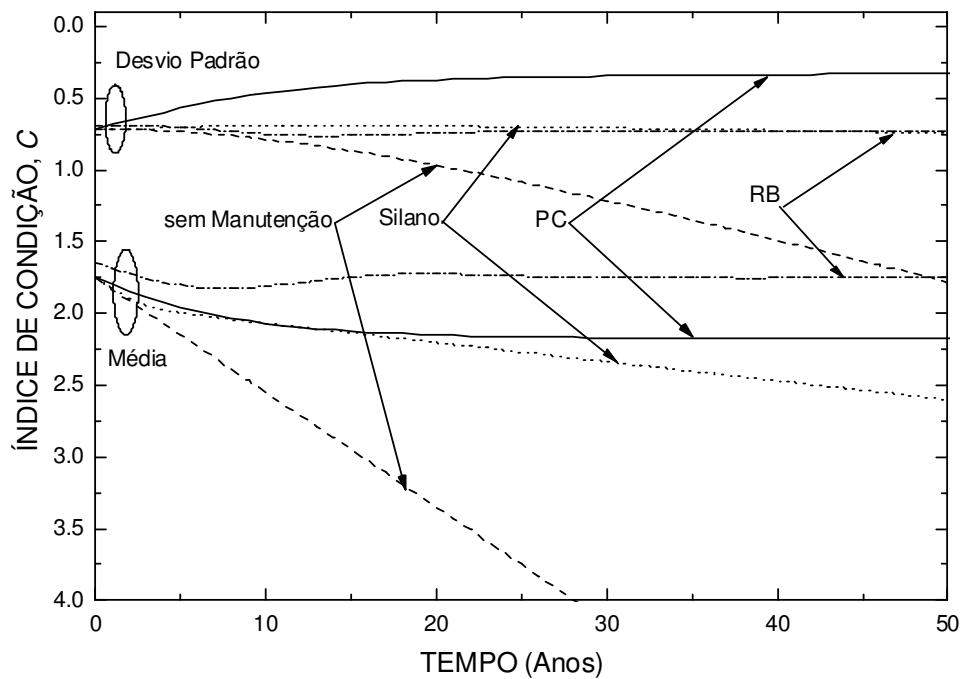


Figura 3.15: Média e desvio padrão do índice de condição

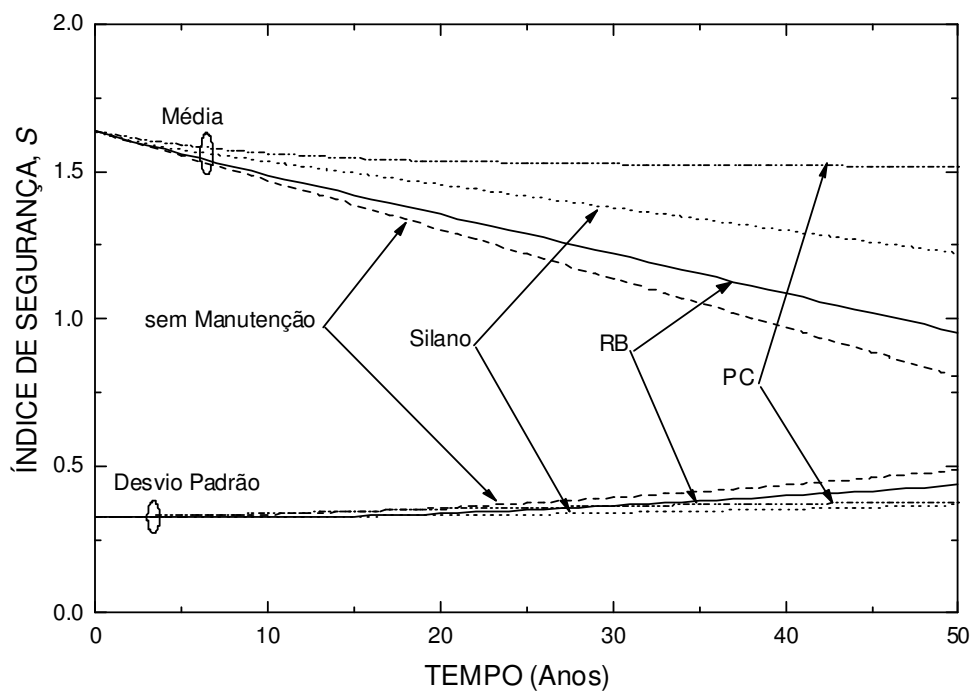


Figura 3.16: Média e desvio padrão do índice de segurança



## 4 Inspeção

### 4.1 Generalidades

Os resultados apresentados anteriormente são baseados apenas na opinião de peritos e não incluem informação proveniente de inspecções. No entanto, a deterioração depende de inúmeros factores e como tal é difícil prever com precisão o desempenho futuro de estruturas. Assim é necessário efectuar inspecções ao longo da vida útil da estrutura, de modo a observar a deterioração ao longo do tempo, para obter novos dados precisos e de confiança num determinado instante. Assim é possível ajustar as previsões de desempenho, obtendo previsões mais fidedignas.

Todos os sistemas de gestão de estruturas baseiam as decisões em planos de inspecções, cujo objectivo é a detecção e classificação de defeitos devido à deterioração da estrutura. As inspecções são também utilizadas como instrumento de avaliação da eficiência da acção de manutenção. Assim é possível determinar e avaliar se a acção de manutenção é eficiente ou não, tal como ajustar os modelos de deterioração.

Numa inspecção todos os elementos de uma estrutura são avaliados e classificados segundo uma tabela de referência (ver Tabela 4.1). Para cada elemento da estrutura é definido um índice de condição, que se baseia na inspecção qualitativa e visual sem recorrer a ensaios não destrutivos e mecânicos.

No entanto, é preciso ter em consideração que não se realizando uma análise estrutural ou ensaios, não se recolhe nenhuma informação directa sobre o índice de segurança.

*Tabela 4.1: Classificação Padrão para elementos de betão armado (Neves 2008)*

Índice da Condição	Descrição
Condição 1	Não são visíveis sinais de deterioração; pode existir fendilhação superficial.
Condição 2	Observam-se pequenas fendas e delaminação localizada; não há armaduras expostas nem sinais de corrosão.
Condição 3	Observa-se fendilhação e delaminação; há armaduras expostas ou sinais de corrosão, mas a perda de secção é nula.
Condição 4	Observa-se corrosão das armaduras ou perda de betão suficientes para reduzir a segurança estrutural.

A classificação da condição é muito simplificada e, em geral, apenas se recorre a ensaios mecânicos quando a estrutura apresenta um grande índice de deterioração.

As inspeções são realizadas de forma a completar um programa de manutenção e permitem fazer um levantamento das anomalias existentes na estrutura, por forma a verificar os efeitos das acções de manutenção aplicadas.

No entanto, as inspeções não são isentas de erros, pois dependem da experiência do inspector, da qualidade da inspeção, da deterioração presente, do local e dos meios disponíveis (Phares *et al.*, 2004), e consequentemente a inspeção deve ser considerada em termos probabilísticos.

### 4.2 Modelos de actualização

Embora extremamente úteis na definição do estado actual da estrutura, as inspeções são relativamente pouco úteis na definição do desempenho futuro (Neves e Frangopol, 2008). Assim, seria interessante definir um modelo que conjugasse a informação obtida através de inspeções com a definida por peritos.

O resultado de uma inspeção depende não só da condição da ponte ou do elemento mas também da experiência do inspector, possibilidade de acesso à estrutura, tipo de defeito, mecanismo de deterioração, entre outros (Phares *et al.*, 2004). Assim, verifica-se que o resultado de uma inspeção é uma função probabilística da condição.

O índice de condição no instante  $T$ ,  $C_T$ , e o resultado de uma inspeção no instante  $T$ ,  $C_{ins}$ , pode ser descrito por uma função de verossimilhança (Neves e Frangopol, 2008):

$$P(C_{ins} | C_T) = L(C_T) \quad (4.1)$$

De acordo com Neves e Frangopol (2008), a informação existente sobre a distribuição probabilística de erros em inspeções é extremamente rara, e como tal é razoável utilizar modelos simplificados para esta relação. Assim, considerou-se que a relação pode ser descrita por uma distribuição normal, com média igual ao resultado da inspeção e desvio padrão definido pela qualidade da inspeção.

De acordo com o teorema de Bayes, a função de densidade de probabilidade do índice de condição, considerando o resultado de inspeções e a opinião de peritos, pode ser definida como (Neves e Frangopol 2008; Ang e Tang, 2007):

$$f''(C_T) = K \cdot L(C_T) \cdot f'(C_T) \quad (4.2)$$

onde  $f''(C_T)$  é a função de densidade de probabilidade do índice de condição no ano  $T$  considerando o resultado de inspeções e a opinião de peritos,  $f'(C_T)$  é a função de densidade de probabilidade do índice de condição no ano  $T$  considerando apenas a opinião de peritos,  $L(C_T)$  é a função de verossimilhança, e  $K$  é uma constante de normalização.

Como se utiliza simulação de Monte-Carlo para definir o desempenho probabilístico das estruturas, a equação (4.2) permite o cálculo da média e desvio padrão do índice de condição no instante  $\tau$ , como (Neves e Frangopol, 2008, Frangopol e Neves, 2008):



$$\mu_C^\tau = \frac{\sum_{i=1}^n C_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \quad (4.3)$$

$$\sigma_C^\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_\tau^i)^2 \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n C_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \right)^2} \quad (4.4)$$

onde  $\mu_C^\tau$  e  $\sigma_C^\tau$  são a média e o desvio padrão do índice da condição no instante  $\tau$  considerando a opinião de peritos e os resultados provenientes da inspecção e  $C_\tau^i$  o índice da condição no instante  $\tau$  associado à amostra  $i$ .

De igual modo, a média e o desvio padrão do índice da segurança, são dados por:

$$\mu_S^\tau = \frac{\sum_{i=1}^n S_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \quad (4.5)$$

$$\sigma_S^\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_\tau^i)^2 \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n S_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \right)^2} \quad (4.6)$$

onde  $\mu_S^\tau$  e  $\sigma_S^\tau$  são a média e o desvio padrão do índice da segurança no instante  $\tau$  considerando a opinião de peritos e os resultados provenientes da inspecção e  $S_\tau^i$  o índice da segurança no instante  $\tau$  associado à amostra  $i$ .

O modelo descrito foi implementado ao programa Update (Neves e Frangopol, 2008). Considera-se que o desvio padrão depende fundamentalmente da qualidade da inspecção. Neste trabalho assume-se que existem diferentes níveis de qualidade de inspecção que dependem fundamentalmente da formação do inspetor.

A introdução da nova informação baseia-se no teorema de Bayes que faz uma ligação entre a informação *à priori* sobre a estrutura e a informação *à posteriori* considerando nova informação disponível. No caso de a nova informação ter um grande desvio padrão, isto é pouca precisão, a nova informação não vai influenciar o modelo. No entanto, se a informação for precisa, as dúvidas vão ser menores e, conseqüentemente, o desvio padrão vai ser mais pequeno e a distribuição de probabilidade estará associada a menor incerteza, como se pode ver na Figura 4.1.

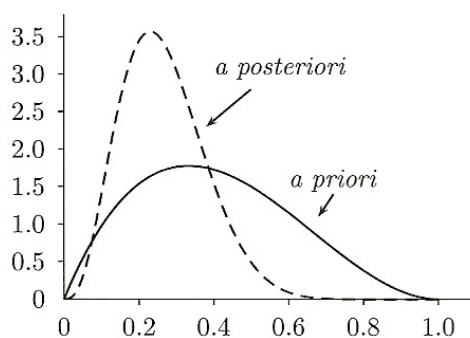


Figura 4.1: Probabilidade de ocorrência à priori e à posteriori (adaptado de Estatística bayesiana)

Antes da realização da inspeção, as possibilidades dos resultados estarem menos precisos são grandes, visto existirem muitas fontes de incerteza. Com efeito, a informação *à priori* é baseada na análise de grandes conjuntos de pontes, não incluindo informação sobre a estrutura em análise.

Na seguinte secção, é analisada a deterioração de elementos estruturais de betão de pontes considerando inspeção, com diversas qualidades de inspeções e diversos instantes de realização da inspeção.

Os dados *à priori* utilizados nesta análise são os descritos no capítulo anterior.

Como anteriormente os dados recolhidos são da autoria de Denton (2002), e são provenientes de vários locais do Reino Unido. A análise de todos os exemplos efectua-se para um período de tempo de 50 anos e o número de simulações é 50000.

### 4.3 Desempenho de estruturas sem manutenção

No presente exemplo, realiza-se uma inspeção no ano 20, considerando-se uma função de verossimilhança com desvio padrão de 0.255 e resultado  $C_{ins} = 3$ . Os resultados provenientes da inspeção são comparados com os resultados sem inspeção e manutenção.

Como na secção anterior, analisa-se uma estrutura que não sofre nenhuma acção de manutenção ao longo da sua vida útil. Os dados estão apresentados na Tabela 3.2.

Na Figura 4.2, observa-se que o resultado da inspeção do ano 20 é inferior à média sem inspeção, indicando que a estrutura estará menos deteriorada que inicialmente previsto. A média da condição tem origem em 1.57, no caso de considerar inspeção e em 1.75 no caso de não inspeção. O valor limite médio  $C_T = 3$  é atingido no ano 16 e no ano 20 sem e com inspeção, respectivamente. As inclinações, que correspondem a taxa de deterioração média da estrutura, são de 0.08 e de 0.074 para a curva sem e com inspeção, respectivamente. Verifica-se de igual modo que o desvio padrão da inspeção do ano 20 é inferior ao desvio padrão sem inspeção ao longo dos 50 anos. Considerando o efeito da inspeção observa-se uma grande redução no desvio padrão. Com efeito, quando não se considera inspeção, as previsões são baseadas no desempenho de todas as estruturas e não de uma delas em

particular. Assim, dados sobre uma estrutura reduzem fortemente a incerteza sobre o seu desempenho.

Enquanto a incerteza sem inspecção aumenta ao longo da vida da estrutura, com inspecção esta é mínima, próximo do instante da inspecção. Esta redução na incerteza pode ser observada também nos histogramas apresentados. O desvio padrão no ano de inspecção é muito próximo do desvio padrão da função verossimilhança, já que esta é muito menor, que o desempenho *à priori*.

Verifica-se assim que a previsão inicial é pessimista e, como tal, a média e o desvio padrão do índice de condição sem inspecção são superiores a média e ao desvio padrão do índice da condição com inspecção.

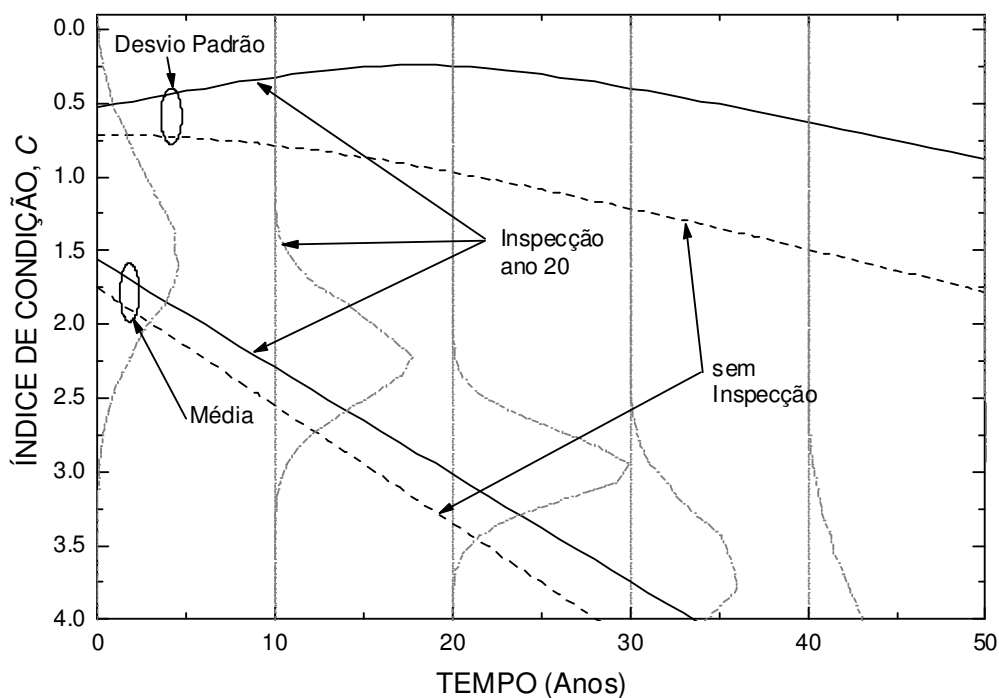


Figura 4.2: Média e desvio padrão do índice da condição considerando uma inspecção no ano 20

Na Figura 4.3, compara-se o índice de segurança com os valores calculados no capítulo 3. Verifica-se que não existe diferença tanto na média como no desvio padrão com e sem inspecção, por não existir nenhuma correlação entre o índice de segurança e o índice de condição. No entanto, embora a inspecção não faculte dados directos sobre o índice da segurança por não se realizarem ensaios nem análises estruturais, não é razoável assumir que estas grandezas sejam independentes, como se estudará na secção 4.7.

Os resultados apresentados mostram que a realização de uma inspecção possibilita uma nova avaliação da estrutura. O decisor tem ao seu dispor novos dados que reduzem as incertezas, reduzindo a dispersão do desempenho durante a vida útil, em termos do índice da condição. Em termos do índice de segurança, a independência entre os dois indicadores de desempenho implica que a inspecção não altera as previsões de desempenho futuro.

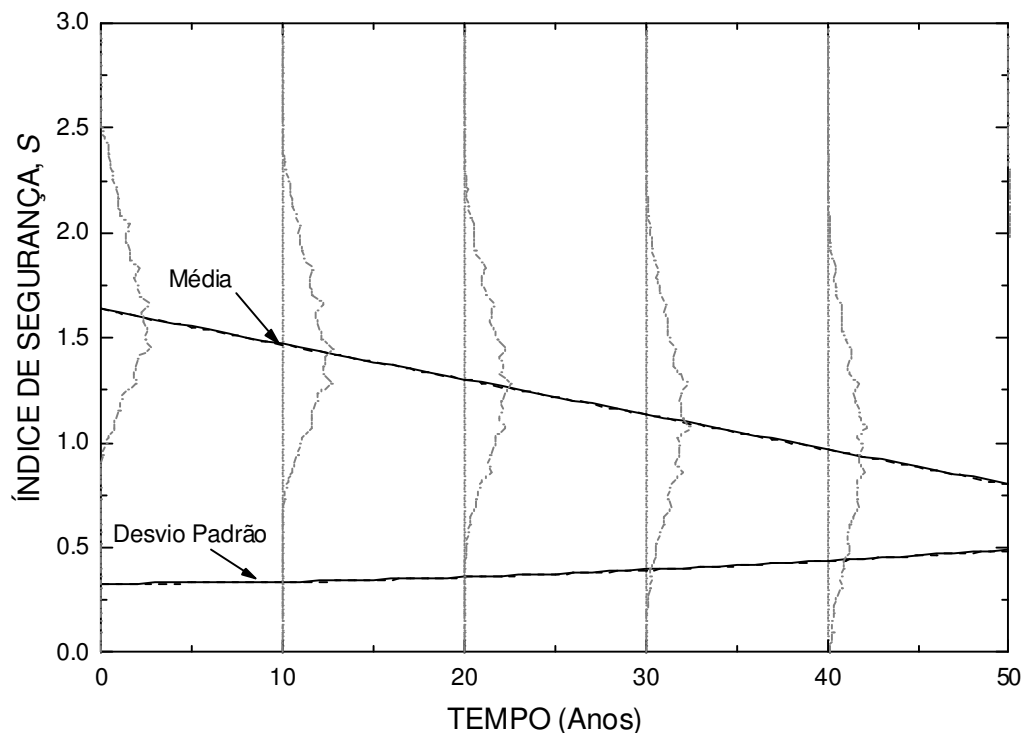


Figura 4.3: Média e desvio padrão do índice da segurança considerando uma inspeção no ano 20

De modo a compreender melhor a influência dos novos dados obtidos aquando da inspeção, analisa-se com mais pormenor as variáveis associadas ao desempenho considerando ou não inspeção. As variáveis aleatórias significativas para o problema são os índices de condição e de segurança iniciais e as respectivas taxas de deterioração.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 são apresentados os histogramas da condição inicial e da taxa de deterioração da condição. Observa-se que o índice da condição inicial sem inspeção tem uma distribuição triangular. No caso de se considerar uma inspeção no ano 20, observa-se que a distribuição deixa de ser triangular e passa a ter uma forma irregular. O intervalo de valores possíveis da condição inicial com inspeção é menor que o correspondente intervalo sem inspeção. Verifica-se também que o índice de condição é menor do que o previsto. De facto, a pequena diferença observada entre os dois valores da condição inicial deve-se por os valores da média observado e previsto serem próximos, como se verifica na Figura 4.2.

Na Figura 4.5, pode observar-se que a taxa de deterioração da condição sem inspeção tem uma distribuição triangular como acontece com a condição inicial. A taxa de deterioração do índice da condição com inspeção tem, como a condição inicial com inspeção, uma forma irregular. Verifica-se também que o valor da taxa de deterioração com inspeção é inferior ao valor da taxa de deterioração inicial, já que a previsão inicial é pessimista. Como a inspeção é realizada no ano 20, já teve lugar alguma deterioração e, consequentemente, a informação recolhida permite inferir sobre a taxa de deterioração real da estrutura.

Conclui-se portanto, que a previsão inicial é pessimista, tendo em conta que a condição prevista é superior à condição observada aquando a inspeção.

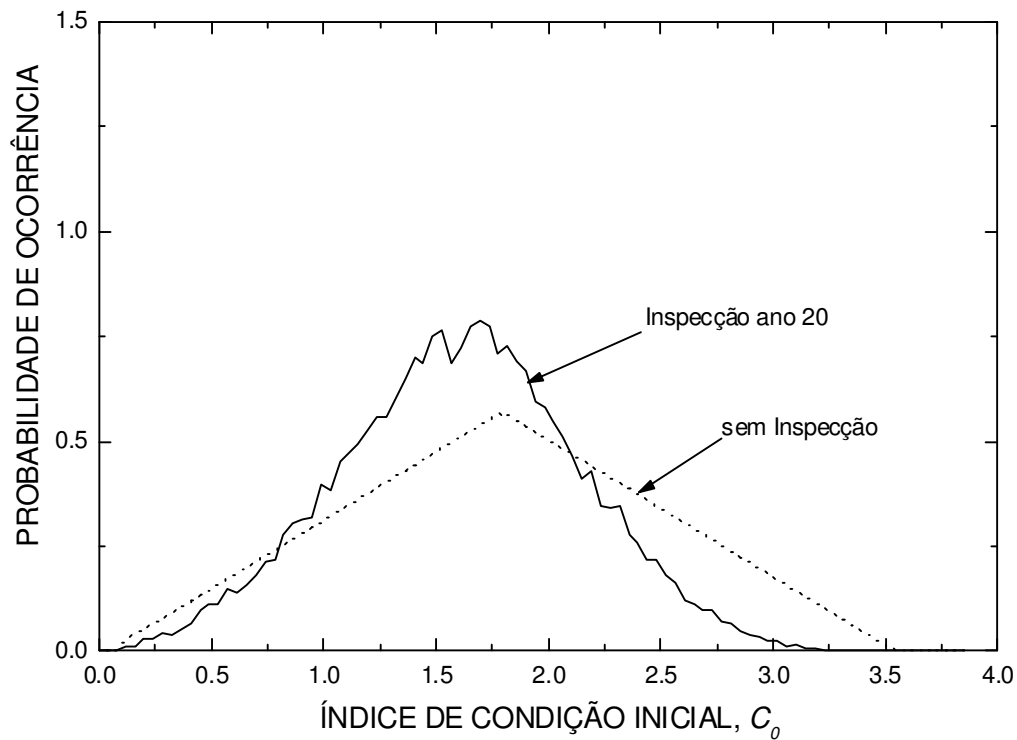


Figura 4.4: Histograma do índice de condição inicial com e sem inspeção

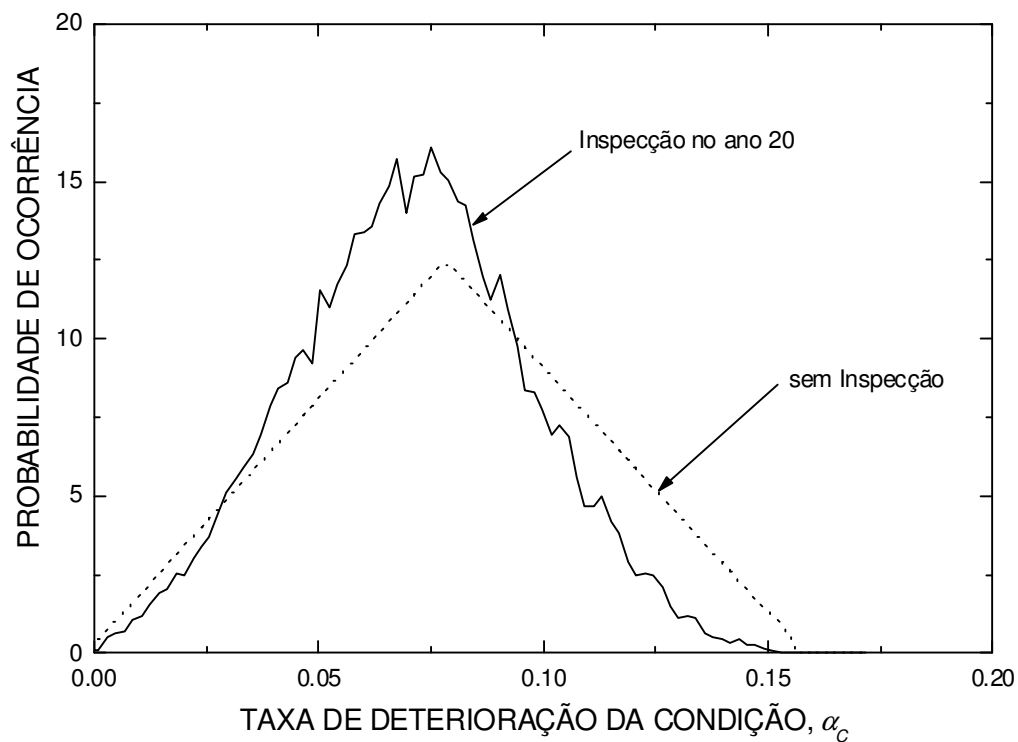


Figura 4.5: Histograma da taxa de deterioração da condição com e sem inspeção

Em termos do índice da segurança não se verifica nenhuma diferença por esta não ser afectada pela inspeção como se referiu anteriormente.

#### 4.4 Inspeção alterando o ano da inspeção

Na secção anterior foram analisados os efeitos da realização de uma inspeção realizada no ano 20. Nesta secção pretende-se estudar os efeitos de uma inspeção realizada em anos diferentes, comparando-os com os associados à realização de uma inspeção no ano 20. Assim, são analisados os dados relativos a diferentes inspeções, nomeadamente uma inspeção nos anos 10, 20, 30, 40 e 50, e comparados com os dados sem inspeção. Assume-se que todas as inspeções tiveram resultado  $C_{ins} = 3.0$  e que a função de verossimilhança tem  $\sigma = 0.255$ .

Na Figura 4.6 estão apresentados as médias e os desvio padrões resultantes de uma inspeção efectuada no ano 10, 20, 30, 40 e 50. Observa-se que, quanto mais tarde se realiza a inspeção, menor é a média do índice de condição. As origens das inspeções do ano 30, 40 e 50 são próximas de 1.30, enquanto para inspeções nos anos 10 e 20 estas são substancialmente mais altas. No que diz respeito ao desvio padrão, observa-se que quanto mais cedo se realiza a inspeção menor é o desvio padrão no início da vida da estrutura. O efeito da inspeção, em termos de desvio padrão, reduz-se conforme o intervalo de tempo desde a sua realização aumenta para diferentes instantes de inspeção.

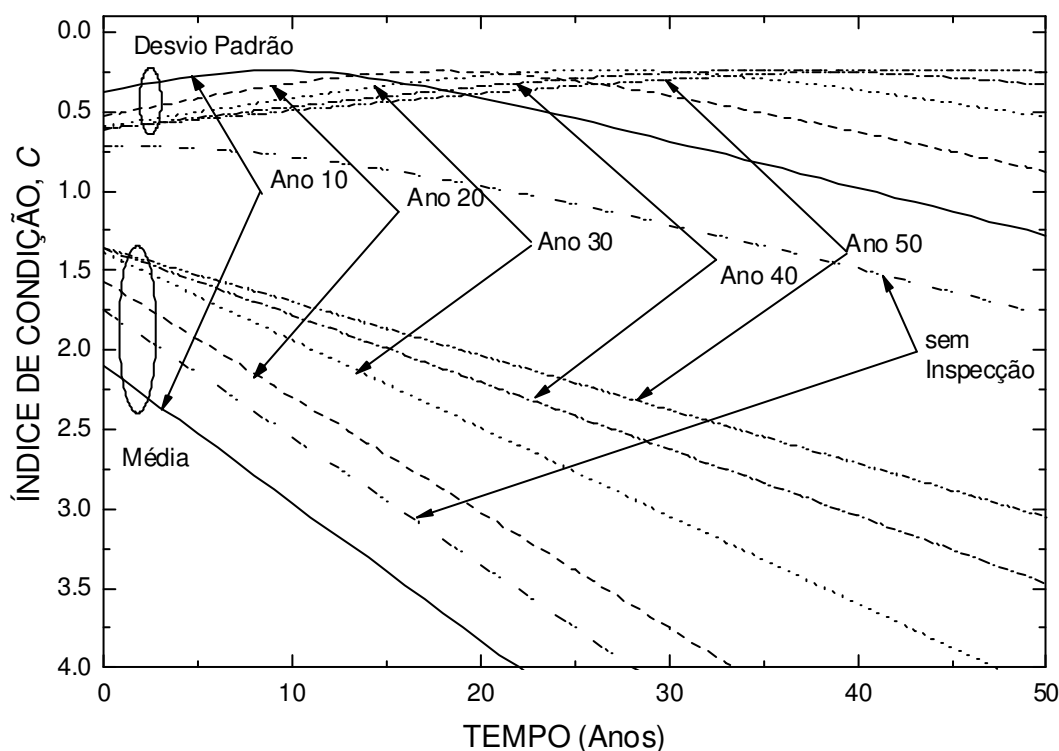


Figura 4.6: Comparação da média e desvio padrão do índice de condição para diferentes anos de inspeção

Observa-se de igual modo que o índice de segurança, tanto em termos de desvio padrão como da média, não são influenciados. Como na secção anterior, o índice de segurança não é influenciado pela inspeção.

De seguida são analisadas com mais pormenor as variáveis aleatórias associadas ao processo de deterioração do índice de condição, nomeadamente, o índice de condição inicial e a respectiva taxa de deterioração, considerando os diferentes instantes de inspecção.

Na Figura 4.7 está representado o histograma do índice de condição inicial. Observa-se que ao realizar uma inspecção cedo, é possível recolher dados que afectam o índice de condição inicial. De facto, verifica-se que distribuição é mais estreita para a inspecção do ano 10 em comparação com as restantes inspecções. Ao efectuar uma inspecção tardia, os dados recolhidos não influenciam tanto o índice de condição inicial.

Na Figura 4.8 apresenta-se o histograma da taxa de deterioração da condição. Como se observa, quanto mais tarde se realiza a inspecção mais estreita é a probabilidade de ocorrência da taxa de deterioração. De facto, quanto mais tarde se realiza a inspecção, maior é o impacto da taxa de deterioração no desempenho no instante de inspecção. Assim é possível determinar com maior probabilidade a real taxa de deterioração.

Em relação à segurança inicial e a respectiva taxa de deterioração, não se observa, quaisquer variações, já que não existe nenhuma correlação entre o índice de segurança e de condição.

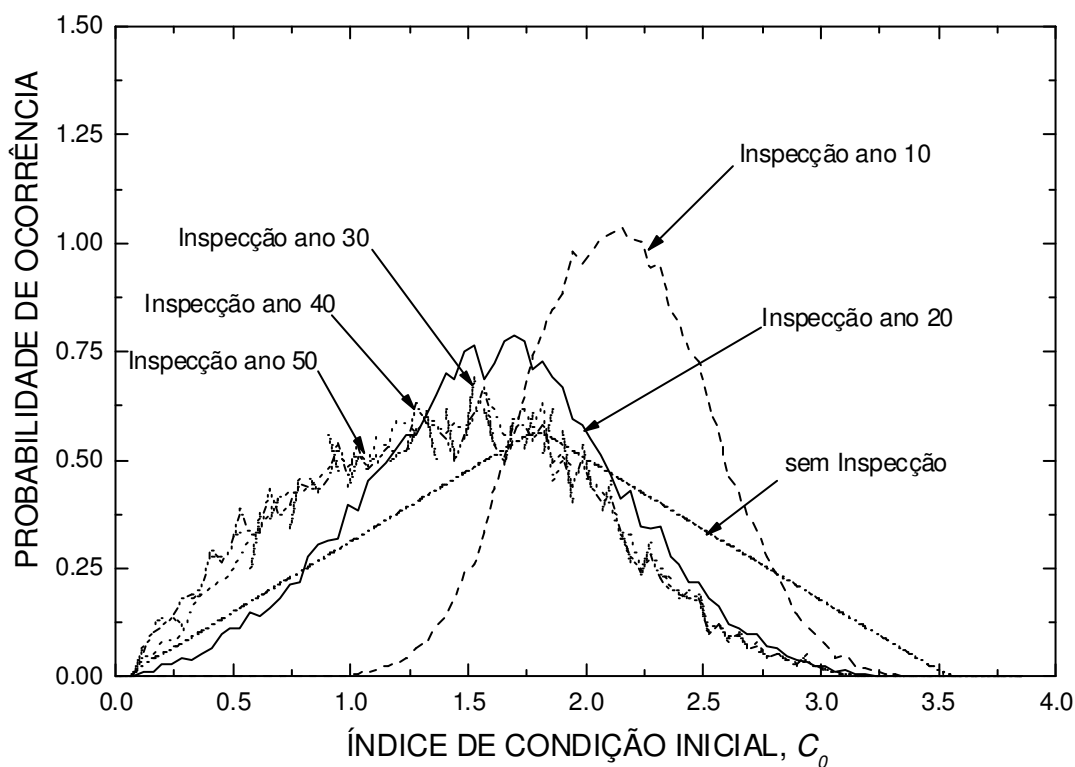


Figura 4.7: Histograma do índice de condição inicial para diferentes anos

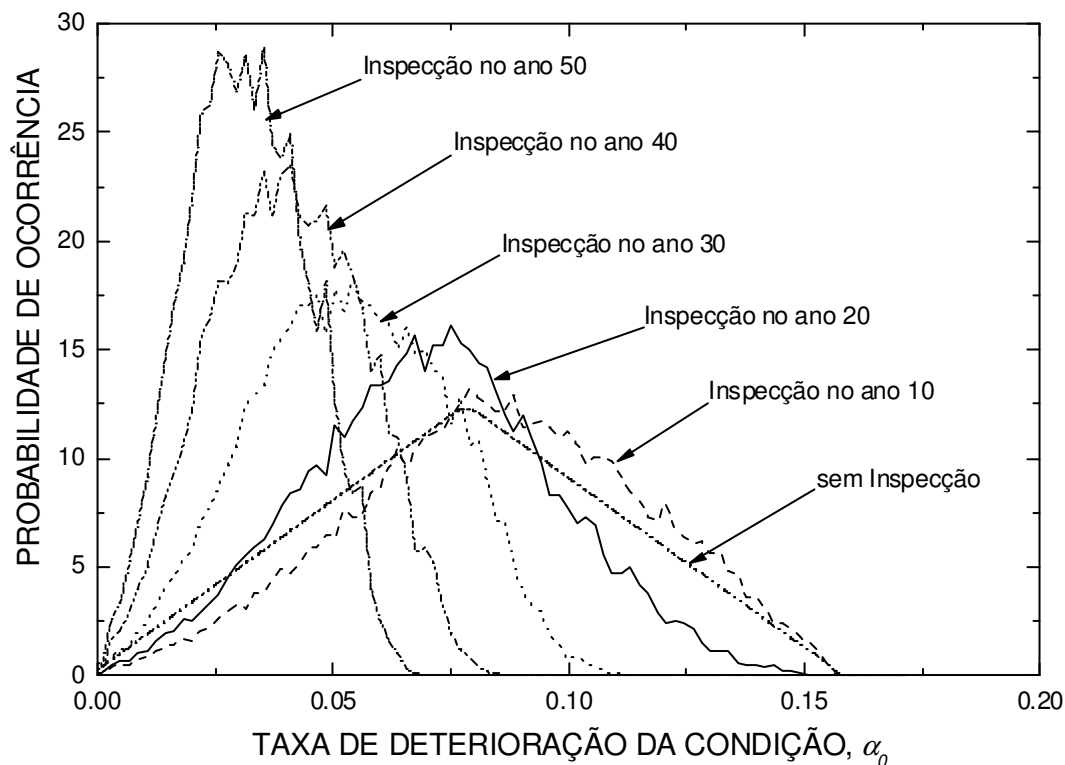


Figura 4.8: Histograma da taxa de deterioração da condição para anos diferentes

#### 4.5 Inspeção com diferentes qualidades

A relação entre o resultado da inspeção e o índice da condição é caracterizada pela média e pelo desvio padrão da função de verossimilhança. Este último representa a qualidade da inspeção, que é um factor fundamental da inspeção. De modo a compreender a ligação da qualidade da inspeção com o índice da condição e da segurança, são analisadas, nesta secção, diversas qualidades de inspeção. Assim, considera-se uma inspeção com um desvio padrão de 0.1, 0.255, 0.5, 0.75 e por fim 1, isto é uma inspeção de boa qualidade (0.1) e de má qualidade (1).

A probabilidade dos resultados das inspeções serem errados, corresponde à probabilidade de a condição ser inferior a 2.5 ou superior a 3.5 ( $P(C < 2.5 \cup C > 3.5)$ )



Tabela 4.2: Probabilidade de uma leitura errada

Qualidade da inspecção	$P(C < 2.5)$	$P(C > 3.5)$	$P(C < 2.5 \cup C > 3.5)$
0.10	$2.9 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^{-7}$
0.26	0.02	0.02	0.05
0.50	0.16	0.16	0.32
0.75	0.25	0.25	0.50
1.00	0.31	0.31	0.62

Como se pode observar da Tabela 4.2, a probabilidade do resultado da inspecção estar errado é significativa para  $\sigma = 0.5$  (32%) e muito grande para  $\sigma = 0.75$  e  $\sigma = 1.0$ .

Na Figura 4.9, observa-se que através de uma melhor qualidade de inspecção (menor desvio padrão), se obtém uma menor média e um menor desvio padrão. De facto, a actualização bayesiana considera que a distribuição *à posteriori* é uma média ponderada da verossimilhança e de distribuição *à priori*, sendo os factores de ponderação os desvios padrões de cada uma destas distribuições. Assim, um pequeno desvio padrão da verossimilhança faz tender os resultados para esta. Ou seja, quanto melhor é a qualidade da inspecção, mais os resultados obtidos se aproximam dos observados. Verifica-se também que, mesmo através de uma inspecção de má qualidade (desvio padrão igual à 1) se obtém dados associados a uma menor incerteza.

Como não existe nenhuma correlação entre o índice da segurança e o índice da condição, as alterações observadas no índice da condição não alteram o índice da segurança.

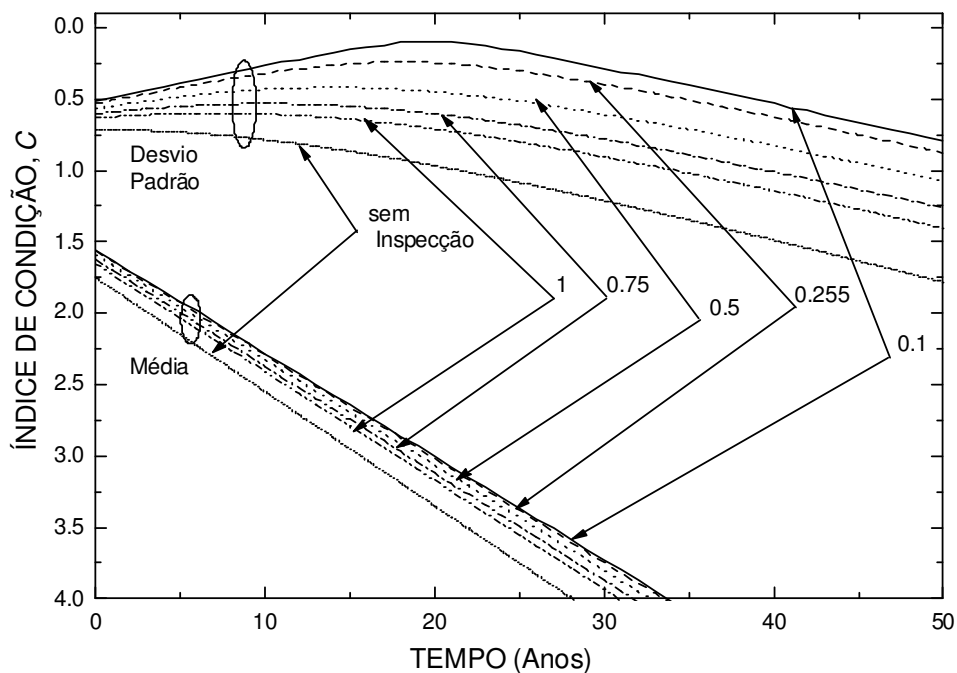


Figura 4.9: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades de inspeção

Como sucedeu nas secções anteriores, também são analisadas as duas variáveis que caracterizam o índice de condição, nomeadamente o índice de condição inicial e a respectiva taxa de deterioração. Os histogramas das duas variáveis estão apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

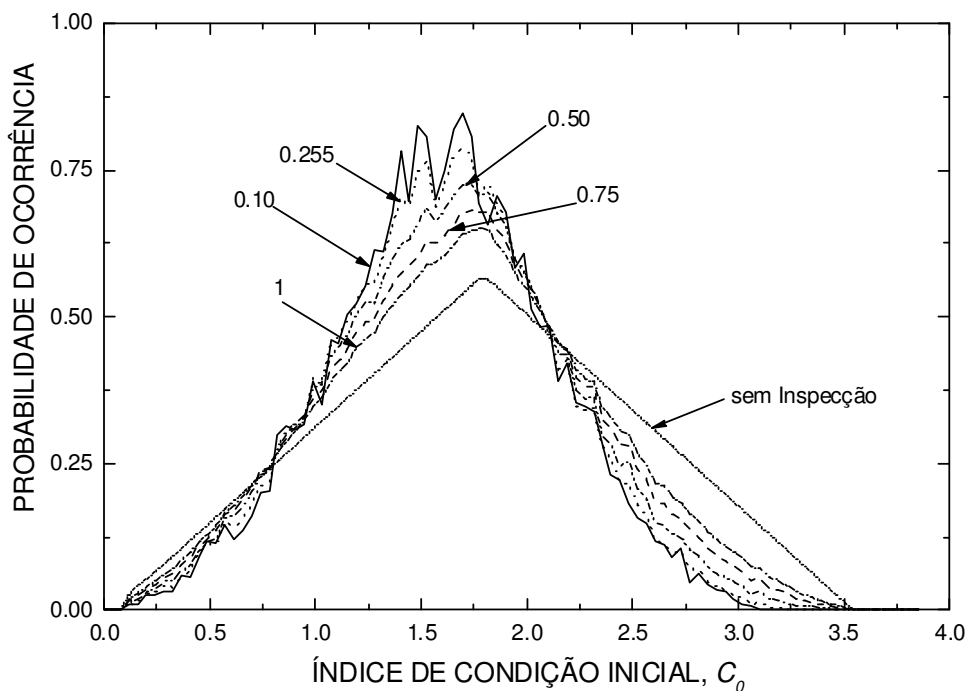


Figura 4.10: Histograma do índice de condição inicial para diferentes qualidades de inspeção

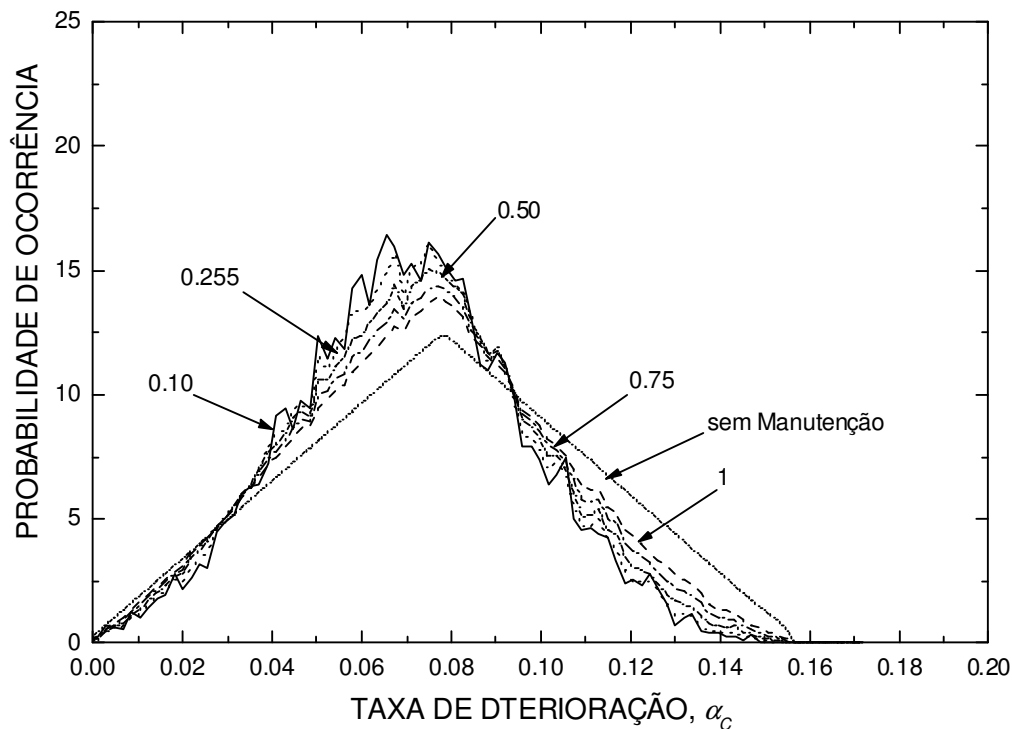


Figura 4.11: Histograma da taxa de deterioração de condição para diferentes qualidades de inspecção

Verifica-se da Figura 4.10 que quanto melhor é a qualidade de inspecção, menor é a variabilidade do índice de condição inicial. As diferenças observadas entre os resultados são, no entanto, pouco significativas.

Analisando a Figura 4.11 conclui-se que, através de uma inspecção com qualidade, se obtêm valores mais precisos da taxa de deterioração que com uma inspecção com má qualidade. No entanto, a diferença dos resultados entre as duas inspecções não são grandes, isto é, apesar da inspecção ser de má qualidade é possível retirar conclusões válidas.

#### 4.6 Comparação de diferentes resultados de inspecções

A análise realizada até aqui assumiu que o resultado da inspecção seria o mesmo independentemente do instante em que esta é realizada. No entanto, quanto mais tarde se realiza a inspecção mais provável é que o desempenho da estrutura seja pior. Assim, nesta secção são comparados resultados assumindo que o valor obtido na inspecção é próximo do percentil 75 do índice de condição sem inspecção.

Assim, considerou-se uma inspecção com resultado  $C_{ins}=2$  no ano 10, resultado  $C_{ins}=3$  no ano 25 e por fim resultado  $C_{ins}=4$  no ano 42. Para os três exemplos considera-se que uma função de verossimilhança com um desvio padrão de 0.255, e consideram-se 50000 simulações para um período de tempo de 50 anos. Como nos exemplos anteriores não se considera acções de manutenção.

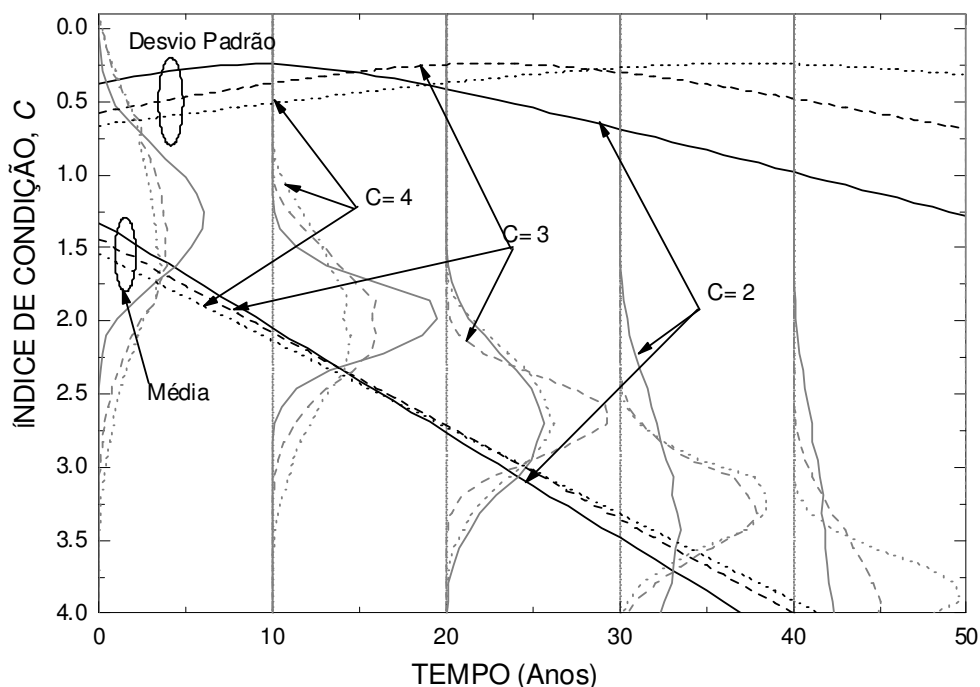
Na Figura 4.13 verifica-se que, as médias do índice de condição associadas às três inspeções têm pequenas diferenças. Observa-se que a inspeção com resultado  $C_{ins} = 4$  altera significativamente a taxa de deterioração, mas que, o índice de condição inicial é muito próximo do valor original. Na Tabela 4.3 apresenta-se uma comparação dos diferentes índices de condição iniciais, assim como das taxas de deterioração.

*Tabela 4.3: Comparação do índice de condição inicial e taxa de deterioração*

	Sem Inspeção	$C_{ins} = 2$	$C_{ins} = 3$	$C_{ins} = 4$
Índice de condição inicial ( $C_0$ )	1.75	1.33	1.56	1.63
Taxa de deterioração da condição ( $\alpha_c$ )	0.08	0.0719	0.0726	0.059

Verifica-se na Tabela 4.3 que uma inspeção mais tardia influencia fundamentalmente a taxa de deterioração, já que a incerteza no desempenho está fundamentalmente associada a esta variável. Para inspeções realizadas cedo, a principal alteração é verificada na condição inicial.

No que diz respeito ao desvio padrão, observa-se que o menor desvio padrão está associado à menor média da inspeção. O valor mínimo do desvio padrão ronda o valor 0.255, o que representa a qualidade de inspeção, e é atingido próximo do ano em que a inspeção se realiza. Verifica-se de igual modo que quanto mais cedo se realiza a inspeção, maior é o desvio padrão no final da vida útil da estrutura.



*Figura 4.12: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%*

Nas Figuras 4.13 e 4.14 apresentam-se os histogramas da condição inicial e da taxa de deterioração. Verifica-se na Figura 4.13 que a distribuição da condição inicial é triangular. Quanto mais cedo se realiza a inspeção, menor é a dispersão da condição inicial, tendendo a função densidade de probabilidade para a do índice de condição inicial sem inspeção para as inspeções tardias. Os valores da condição inicial das restantes inspeções têm uma distribuição idêntica à distribuição sem inspeção.

Na Figura 4.14, apresenta-se o histograma da taxa de deterioração da condição. Observa-se que a distribuição da taxa de deterioração da condição tem menor dispersão para inspeções mais tardias, porque a estrutura teve tempo suficiente para se deteriorar e esta variável tem maior impacto no desempenho da estrutura no instante de inspeção.

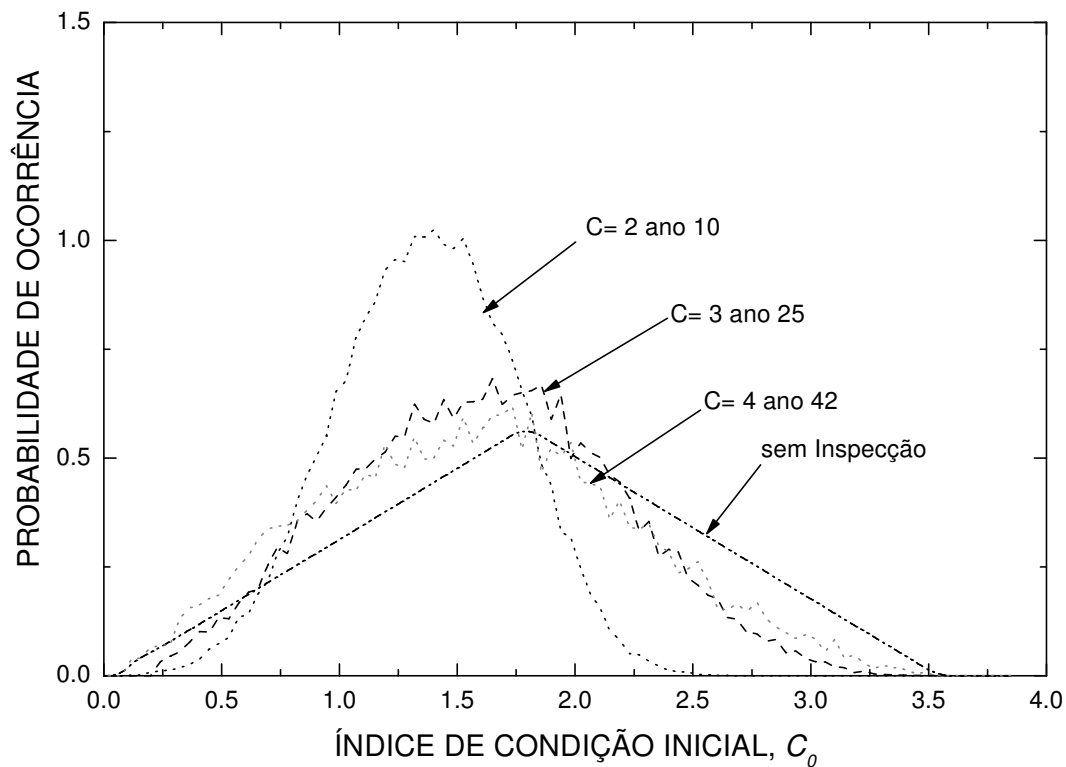


Figura 4.13: Histograma do índice de condição inicial para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

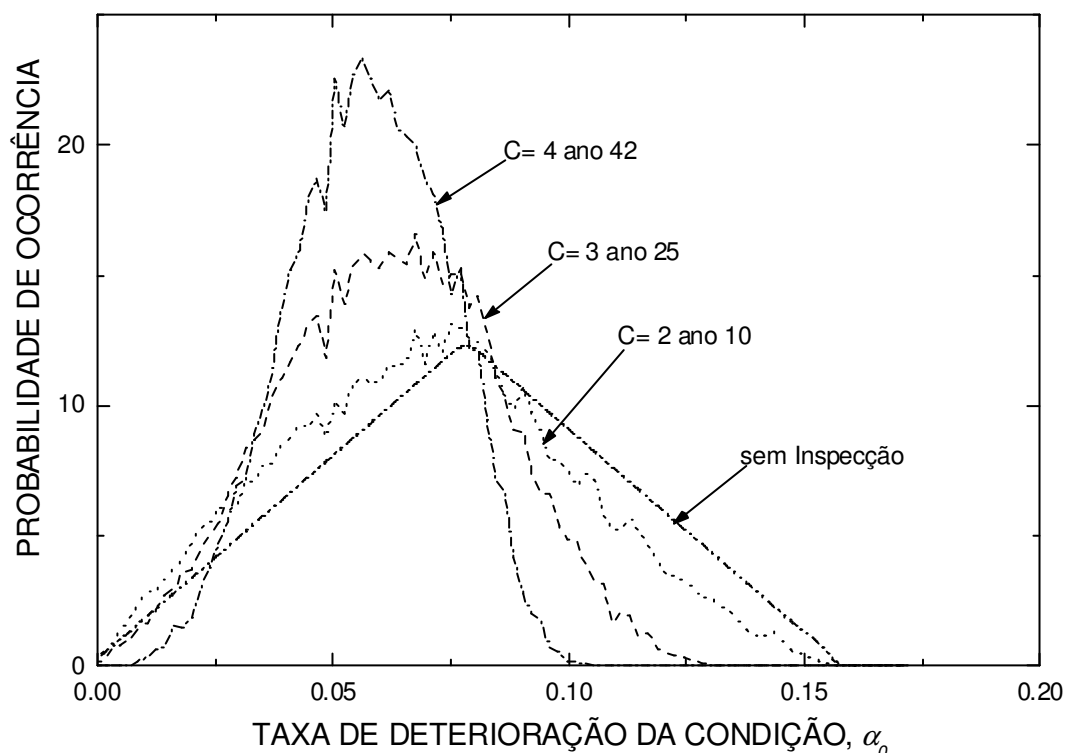


Figura 4.14: Histograma da taxa de deterioração da condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

#### 4.7 Correlação entre a condição e a segurança

Até este ponto assumiu-se que não havia correlação entre o índice de condição e segurança e, como resultado, as inspeções não afectam o índice de segurança. Nesta secção analisa-se o efeito de uma inspeção considerando que existe correlação entre dois pares de parâmetros fundamentais: (i) condição inicial e segurança inicial; (ii) taxa de deterioração da condição e taxa de deterioração da segurança. As correlações escolhidas são de 0.5, 0.75 e 0.9, e são comparadas com os resultados obtidos sem correlação. Em todos os casos, a inspeção realiza-se no ano 20 com resultado  $C_{ins} = 3$  e a função de verossimilhança com desvio padrão 0.255. São efectuadas 50000 simulações ao longo de 50 anos.

A existência de correlação não afecta os resultados em termos de condição.

Na Figura 4.15, observa-se que ao considerar correlação entre o índice de segurança e de condição, se verifica alterações das médias e desvios padrões do índice de segurança. De facto, quanto maior é a correlação, maior é a média da segurança e menor é o desvio padrão. Pois quanto maior é a correlação entre os dois índices, mais dados se podem retirar da inspeção sobre o índice de segurança. O menor desvio padrão está associado à maior correlação, como já foi referido, e o valor mínimo do desvio padrão é obtido próximo do ano em que as inspeções se realizam.

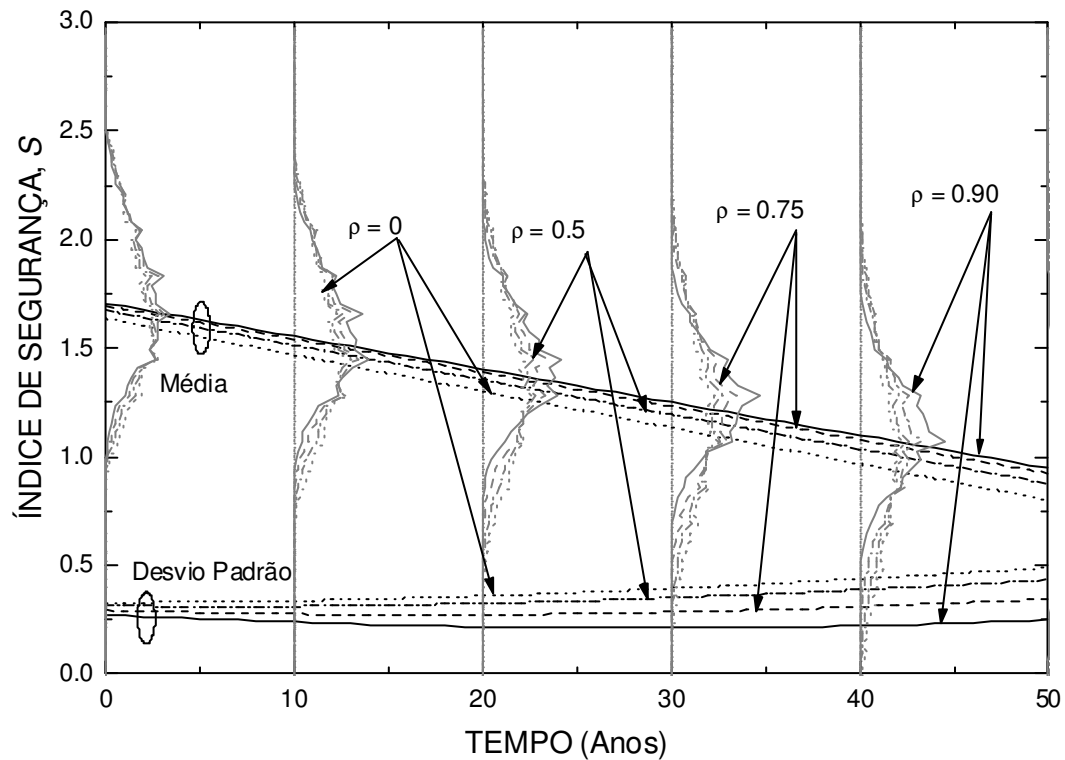


Figura 4.15: Média e desvio padrão do índice de segurança com correlação entre a condição e a segurança

De seguida são analisadas com mais pormenor as duas variáveis que caracterizam o índice de segurança, nomeadamente a segurança inicial e a taxa de deterioração. Na Figura 4.16 apresenta-se a histograma do índice de segurança inicial. Observa-se que a distribuição da segurança inicial é triangular. Além disso quanto maior é a correlação entre a segurança e a condição, menor é a dispersão. O aumento da correlação está associado a uma translação para a direita do índice de segurança inicial, como se tinha observado na Figura 4.15 para o instante  $t=0$ .

Na Figura 4.17 observa-se que a distribuição da taxa de deterioração sem inspeção é triangular. O intervalo de distribuição tende a ser menor quanto maior é a correlação entre o índice de segurança e de condição, havendo uma ligeira translação para menores valores da taxa de deterioração com o aumento da correlação.

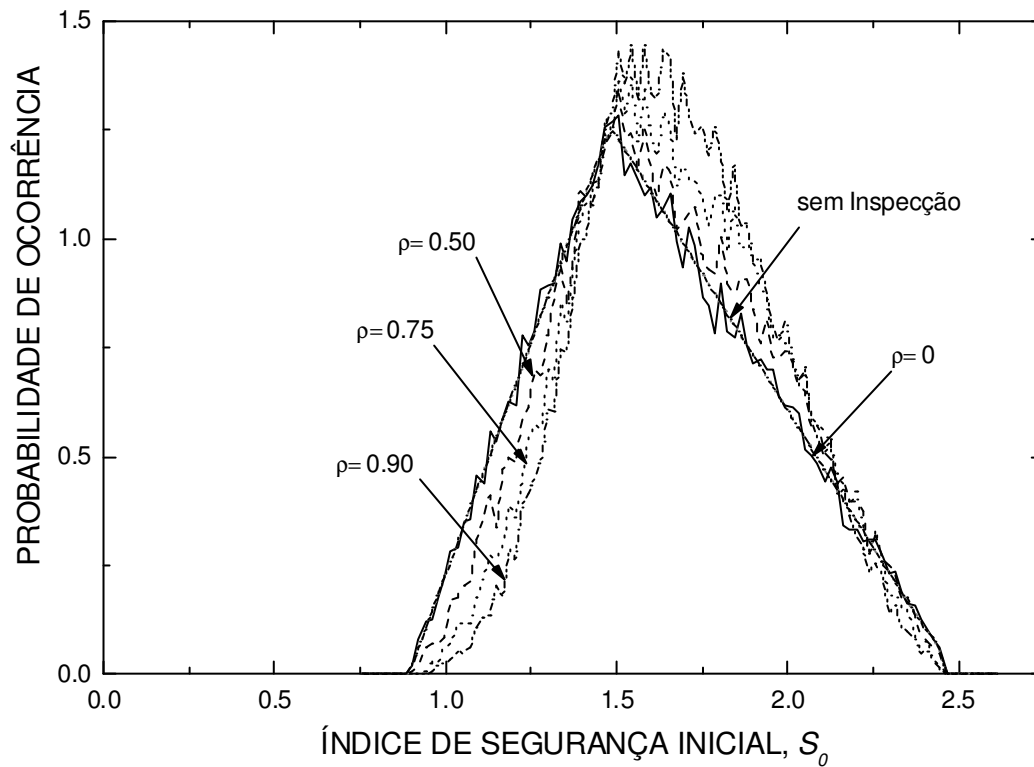


Figura 4.16: Histograma do índice de segurança inicial com correlação entre a segurança e a condição

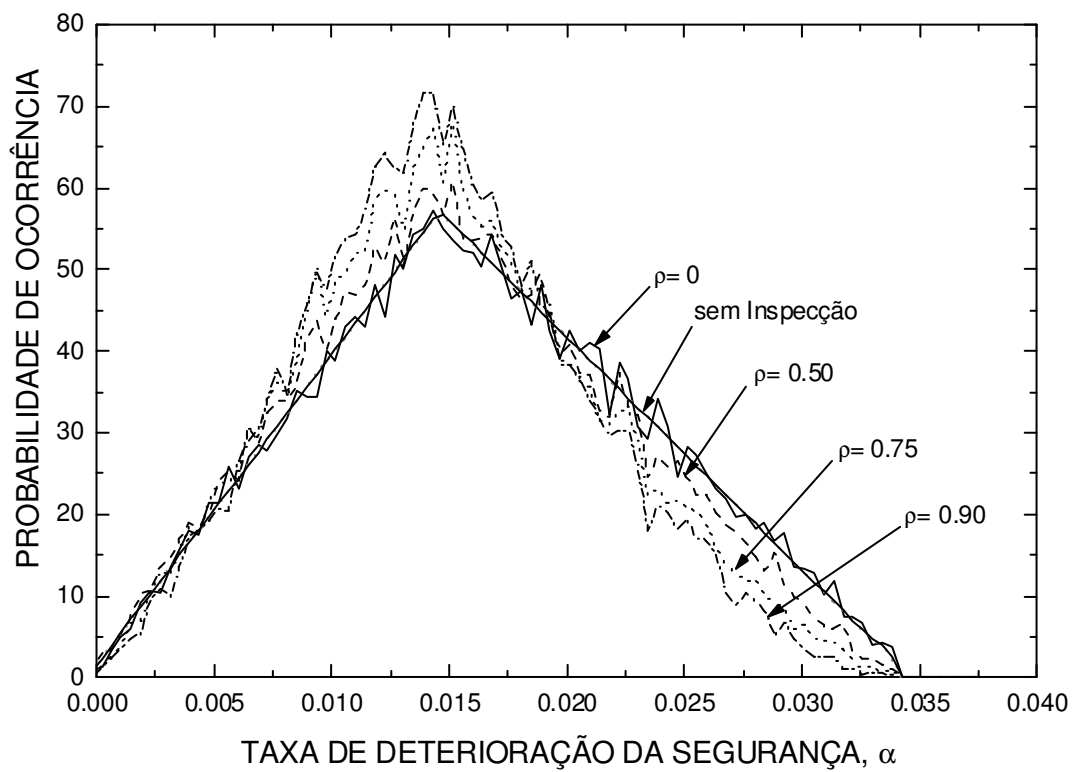


Figura 4.17: Histograma da taxa de deterioração da segurança com correlação entre a segurança e a condição



#### 4.8 Realização de duas inspecções

Nesta secção são estudados os efeitos da realização de duas inspecções. Até agora apenas foram analisados os efeitos de uma inspecção que se realiza num determinado ano. No entanto, essa mesma inspecção pode realizar-se demasiado cedo como demasiado tarde. Assim sendo, efectua-se uma inspecção no ano 10 e no ano 20, assim como uma inspecção no ano 20 e no ano 42. Os resultados são analisados em conjunto com uma inspecção realizada no ano 20, com resultado de  $C_{ins}=3$  e desvio padrão da função de verossimilhança igual à 0.255.

Não se considera nenhuma acção de manutenção e são efectuadas 50000 simulações para um período de 50 anos.

Na Figura 4.18 apresentam-se dois conjuntos de duas inspecções associados a um resultado que têm uma probabilidade de 75% de ser excedido. Os dois conjuntos são compostos por duas inspecções: no primeiro realiza-se uma inspecção no ano 10 com resultado  $C_{ins} = 2$  e uma segunda inspecção no ano 20 com resultado  $C_{ins} = 3$ , e no segundo conjunto uma primeira inspecção no ano 20 com resultado  $C_{ins} = 3$  e uma inspecção no ano 42 com resultado  $C_{ins} = 4$ . Os resultados obtidos são analisados com os resultados de uma inspecção no ano 20 com resultado  $C_{ins} = 3$ . Todas as inspecções estão associadas a função de verossimilhança com desvio padrão de 0.255.

As médias dos resultados têm origens diferentes, sendo que o conjunto de inspecções no ano 10 e no ano 20 se aproxima mais do índice de condição inicial da inspecção do ano 20. Por outro lado a sua taxa de deterioração aproxima-se da taxa de deterioração da inspecção do ano 20 para o final da vida útil da estrutura. O valor limite médio  $C_T=3$  é atingido próximo do ano 20, ano em que se realiza a segunda inspecção. Por outro lado, observa-se que o conjunto de inspecções no ano 20 e no ano 42 tem uma taxa de deterioração que difere muito da taxa de inspecção do ano 20. De facto, a inspecção no ano 42 permite determinar com certeza a taxa de deterioração da estrutura porque esta já teve tempo suficiente para se deteriorar.

Em relação ao desvio padrão, verifica-se que as origens dos dois conjuntos são próximas devido à inspecção do ano 10 que possibilita a recolha de novos dados para o desempenho no início da vida da estrutura. Quando se consideram duas inspecções afastados no tempo, resulta um desvio padrão do índice da condição muito uniforme ao longo da vida útil da estrutura, permitindo uma enorme redução na incerteza.

O desvio padrão da inspecção do ano 20 e 42 é inferior ao longo dos 50 anos e consequentemente deduz-se que os resultados apresentados são os mais fiáveis.

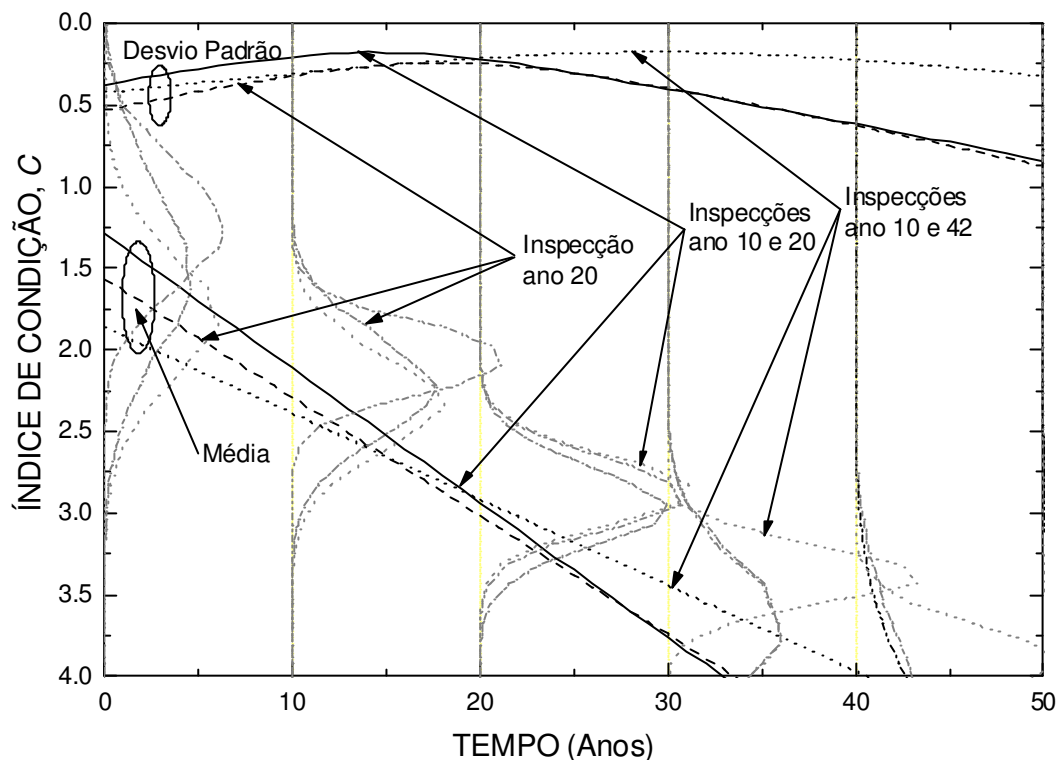


Figura 4.18: Média e desvio padrão do índice de condição com duas inspeções

Conclui-se que ao efectuar duas inspeções, a média do índice de condição é substancialmente inferior em relação à média resultante de uma inspeção. Observa-se também que o desvio padrão das duas inspeções é inferior em relação ao desvio padrão de uma única inspeção. Verifica-se de igual modo que quanto mais tarde se realiza a segunda inspeção, menor é o desvio padrão.

#### 4.9 Conclusão

Ao longo do capítulo foram analisadas diversos instantes de aplicação, qualidades e resultados de inspeções.

Verificou-se que, mesmo uma inspeção realizada muito cedo permite retirar informação útil sobre o índice de condição, e fundamentalmente sobre o índice de condição inicial.

Constatou-se também que, excepto quando se considera que o índice de segurança e de condição são correlacionados, a inspeção não influencia o índice de segurança já que não foram realizados ensaios ou análises estruturais, como foi referido.

De modo a analisar o índice de segurança é necessário que exista correlação entre o índice de segurança e de condição. Assim, verificou-se que através de uma maior correlação é possível retirar mais dados da inspeção, nomeadamente a média é superior ao inicialmente previsto e o desvio padrão é menor.

Observou-se também que quanto mais tarde se realiza a inspecção mais o valor da condição inicial tende para o valor original. O mesmo sucede com a taxa de deterioração quando se realiza uma inspecção muito cedo.

Da análise de dois conjuntos de inspecções conclui-se que é favorável efectuar uma inspecção cedo e uma mais tardia, porque permite recolher informações tanto sobre o índice de condição inicial como sobre a taxa de deterioração. De facto, uma inspecção cedo permite recolher informação sobre o índice inicial da estrutura e uma inspecção tardia permite obter informações sobre a taxa de deterioração.



## 5 Inspeção com uma manutenção baseada no tempo

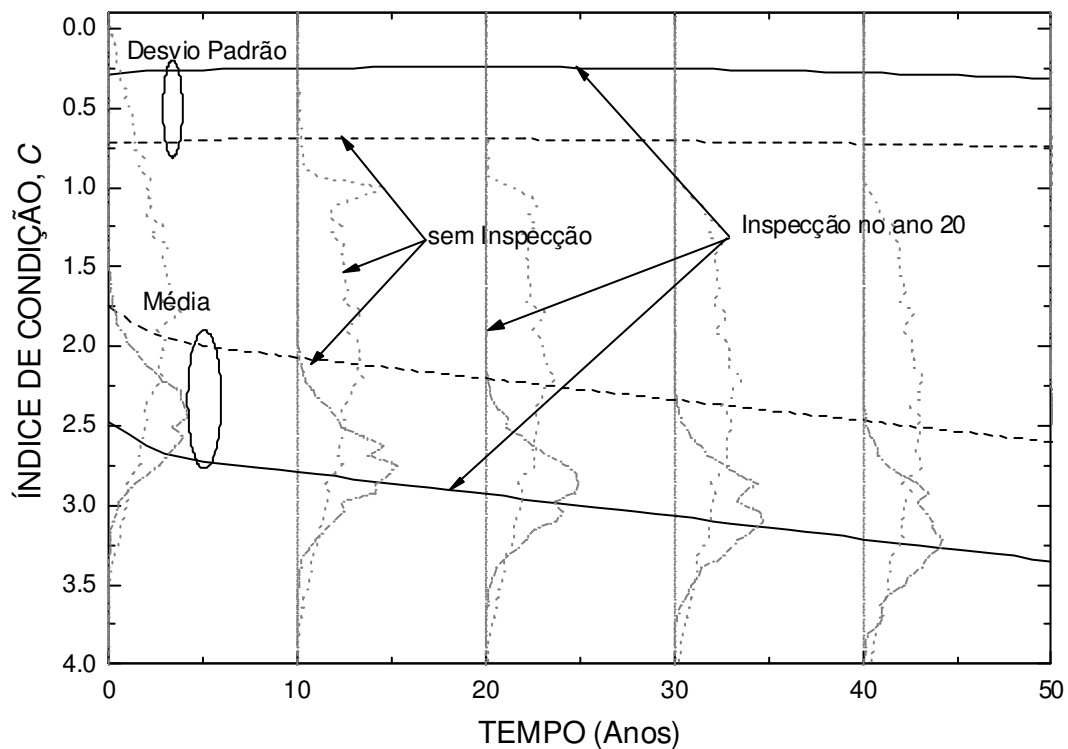
### 5.1 Introdução

Nas secções anteriores, analisou-se a influência de uma inspecção numa estrutura que não está sujeita a acções de manutenção. De seguida vai ser inspeccionada uma estrutura que está sujeita a uma acção de manutenção. A acção de manutenção em questão é o Silano, que é aplicado a intervalos regulares, em média de 3.5 em 3.5 anos. O índice de deterioração da condição decresce em moda 0.01/ano e o índice da segurança é de 0.007 /ano em moda.

Considera-se que a inspecção é efectuada no ano 20, com resultado  $C_{ins} = 3$  e com função de verossimilhança com desvio padrão igual à 0.255. Os dados recolhidos são da autoria de Denton (2002), e provenientes de vários locais do Reino-Unido. A análise de todos os exemplos efectua-se para um período de tempo de 50 anos e o número de simulações é de 50000.

Na Figura 5.1 estão apresentados a média e o desvio padrão com e sem inspecção. Verifica-se que a média com inspecção no ano 20 é superior à média sem inspecção, concluindo que a previsão inicial era optimista e que a estrutura está mais deteriorada do que o inicialmente previsto. A média tem origem em 2.5 com inspecção e em 1.75 sem inspecção mostrando que a inspecção altera, fundamentalmente a previsão da condição inicial. O valor limite médio da condição  $C_T = 3$  é atingido no ano 20, e nunca é atingido no caso de não se considerar nenhuma inspecção. No que diz respeito ao desvio padrão, verifica-se que o desvio padrão com inspecção é muito inferior ao desvio padrão sem inspecção.

Observa-se que o desvio padrão associado à inspecção no ano 20 é praticamente constante ao longo da vida útil da estrutura, sendo o seu valor de 0.255, isto é, corresponde ao desvio padrão da função de verossimilhança. Com efeito, sob o efeito da manutenção, a incerteza é devida fundamentalmente à incerteza da condição inicial substancialmente reduzida pela realização da inspecção, já que a taxa de deterioração sob efeito de Silano tem um desvio padrão bastante pequeno (ver Tabela 3.3)



*Figura 5.1: Média e desvio padrão do índice de condição com manutenção baseada no tempo considerando uma inspeção*

Na Figura 5.2 e 5.3 são analisadas duas variáveis, nomeadamente o índice de condição inicial e a taxa de deterioração da condição. Na Figura 5.2 apresenta-se o histograma da condição inicial com e sem inspeção. Como se observa, a distribuição da condição inicial sem inspeção é triangular. A previsão inicial era optimista, tendo em conta que variância da inspeção do ano 20 é superior à respectiva sem inspeção. A condição inicial com inspeção no ano 20 apresenta um valor mais elevado, e uma distribuição próxima da distribuição normal.

Na Figura 5.3 apresenta-se a taxa de deterioração da condição. Como se verifica a taxa de deterioração com e sem inspeção são praticamente iguais. Com efeito, como a acção de manutenção é aplicada muito frequentemente, a deterioração da estrutura é dada pela taxa de deterioração sob efeito de Silano, e a taxa de deterioração sem manutenção quase não influencia o desempenho e, como tal, quase não é influenciada pela inspeção.

Em relação ao índice de segurança não se observam nenhuma diferença em relação ao índice de condição, por não existir nenhuma correlação entre ambos os índices.

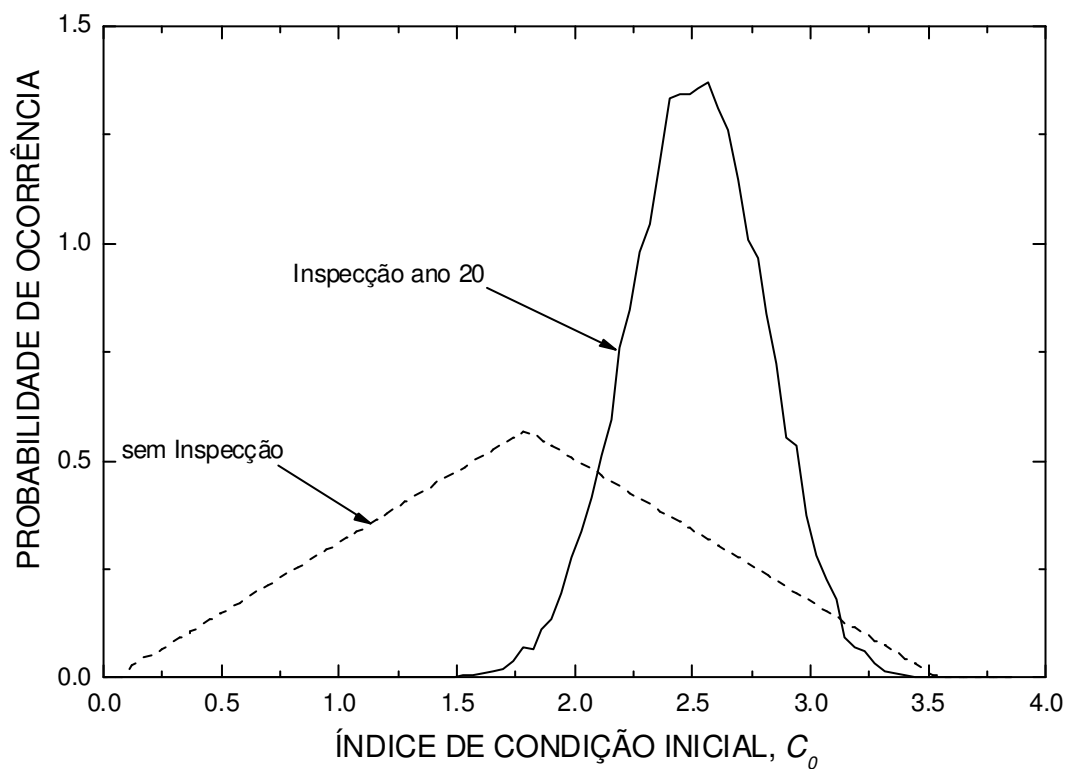


Figura 5.2: Histograma do índice de condição com e sem inspeção

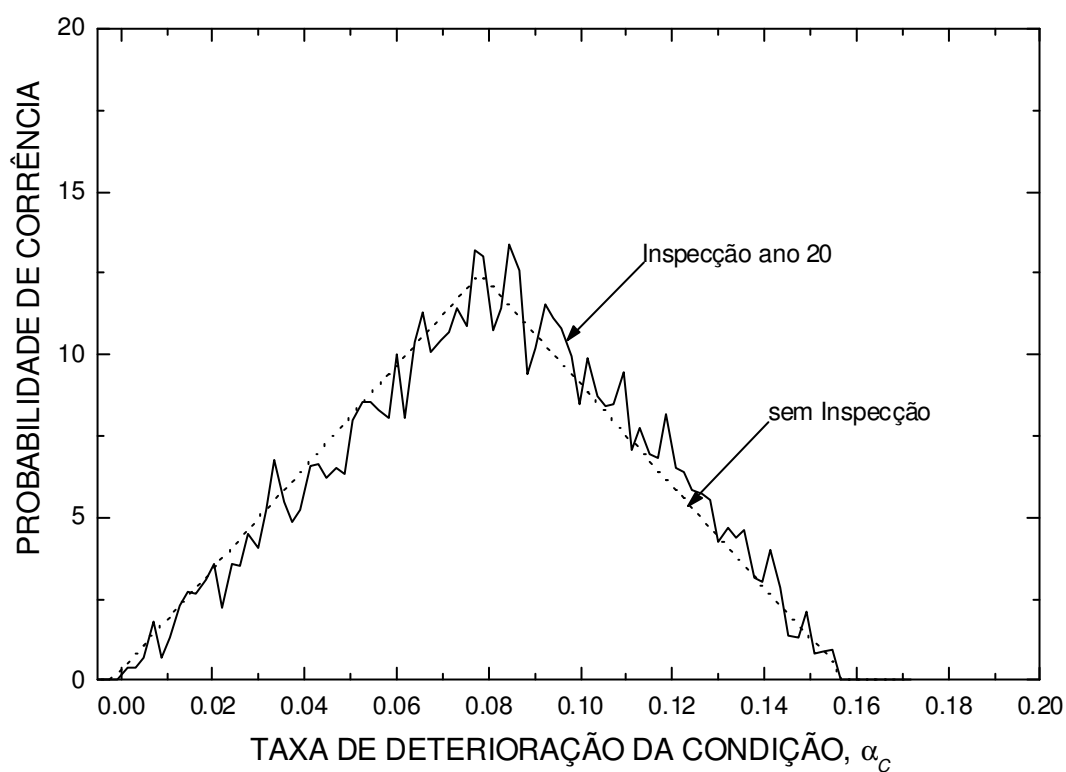


Figura 5.3: Histograma da taxa de deterioração com e sem inspeção

## 5.2 Diferentes anos de inspecção

De seguida são analisados os efeitos da realização de uma inspecção em momentos diferentes, nomeadamente, no ano 10 e 50. Todas as inspecções têm resultado  $C_{ins} = 3$  e função de verossimilhança com desvio padrão igual a 0.255. A acção de manutenção considerada é a acção de manutenção baseada no tempo, o Silano, aplicada de 3.5 em 3.5 anos.

### 5.2.1.1 Ano 10

Os resultados obtidos para uma inspecção no ano 10 são comparados com uma inspecção realizada no ano 20 e sem a realização da inspecção.

Na Figura 5.4, apresentam-se a média e o desvio padrão da inspecção no ano 10. Como vimos anteriormente, sob efeito de Silano, a incerteza está fundamentalmente associada à condição inicial. Assim, a aplicação no ano 10 tem resultado semelhantes aos obtidos para a inspecção no ano 20, mas sofrendo uma translação. Quando a inspecção é realizada para outros anos (ver Figura 5.5), observa-se uma translação da curva associada ao valor médio, mas mantendo quer a forma da curva associada ao valor médio quer ao desvio padrão.

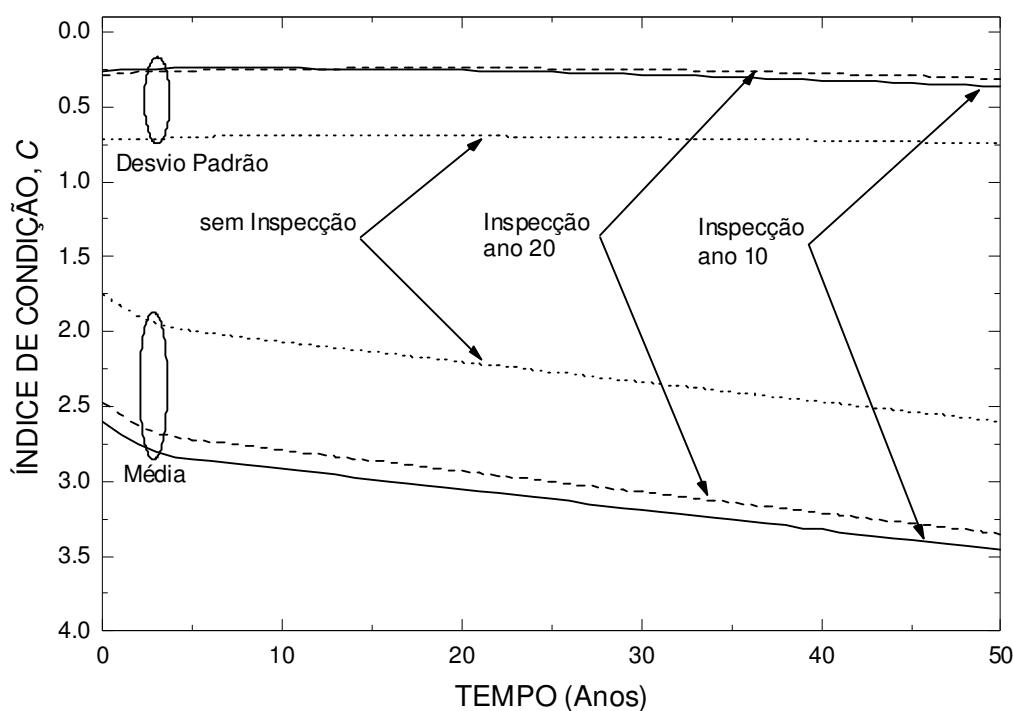


Figura 5.4: Média e desvio padrão do índice de condição considerando uma inspecção ano 10

A segurança não sofre nenhuma alteração na média e no desvio padrão devido à inspecção. Como não existe nenhuma correlação entre a segurança e a condição, os efeitos visíveis no índice de condição não são visíveis no índice de segurança.



### 5.2.1.2 Ano 50

Os resultados associados à realização de uma inspeção no ano 50 são analisados em conjunto com os resultados provenientes da inspeção no ano 20 e sem a realização da inspeção. Considera-se a aplicação de uma acção de manutenção periódica, o Silano, que é aplicada de 3.5 em 3.5 anos.

Na Figura 5.5, apresentam-se as médias e os desvios padrões associados à realização da inspeção no ano 20, no ano 50 e sem inspeção. Como foi referido anteriormente, a incerteza está fundamentalmente associada à condição inicial. Assim a aplicação de uma inspeção no ano 50 tem resultados semelhantes aos obtidos para a inspeção no ano 20, mas sofrendo uma translação.

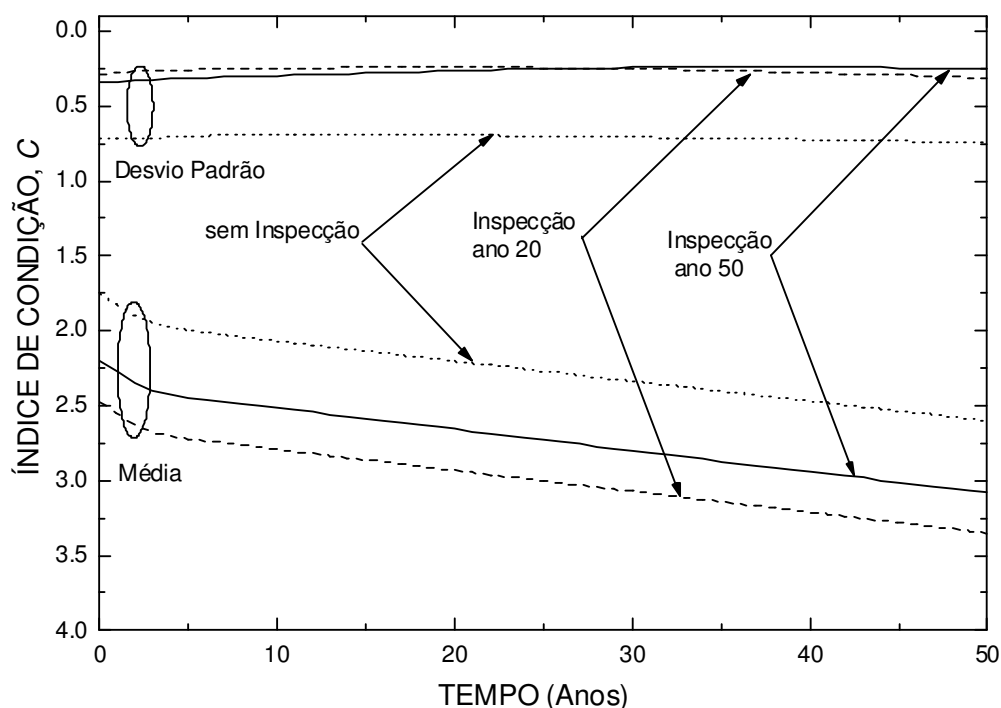


Figura 5.5: Média e desvio padrão do índice de condição considerando uma inspeção ano 50

O índice de segurança não apresenta nenhuma diferença em termos de média e de desvio padrão por não existir nenhuma correlação entre o índice de condição e o índice de segurança.

De seguida são analisadas as variáveis que definem o índice de condição ao longo da vida útil da estrutura considerando a realização de inspeções no ano 10, 20 e 50 e sem inspeção. As variáveis consideradas são o índice de condição inicial e a respectiva taxa de deterioração sob efeito de Silano e sem manutenção.

Na Figura 5.6, observa-se que a condição inicial tem uma distribuição triangular ao contrário das distribuições da condição inicial considerando inspeção. De facto, a condição inicial considerando inspeção tem menor variância, sendo que esta diminui quanto mais cedo se

realiza a inspecção. De facto, para as inspecções mais tardias, os resultados são influenciados também pela taxa de deterioração sob efeito da manutenção, logo verifica-se um ligeiro aumento do desvio padrão.

Na Figura 5.7 apresenta-se o histograma da taxa de deterioração da condição para as diferentes inspecções. Verifica-se que não existe nenhuma diferença na taxa de deterioração ao considerar ou não inspecção. De facto como a acção de manutenção é aplicada de 3.5 a 3.5 anos e tem efeito durante 7.5 anos, a taxa de deterioração corresponde à taxa de deterioração sob efeito do Silano ao longo da vida útil da estrutura.

Na Figura 5.8 apresenta-se a taxa de deterioração sob efeito do Silano. Como se observa a diferença entre os diversos histogramas, é relativamente pequena

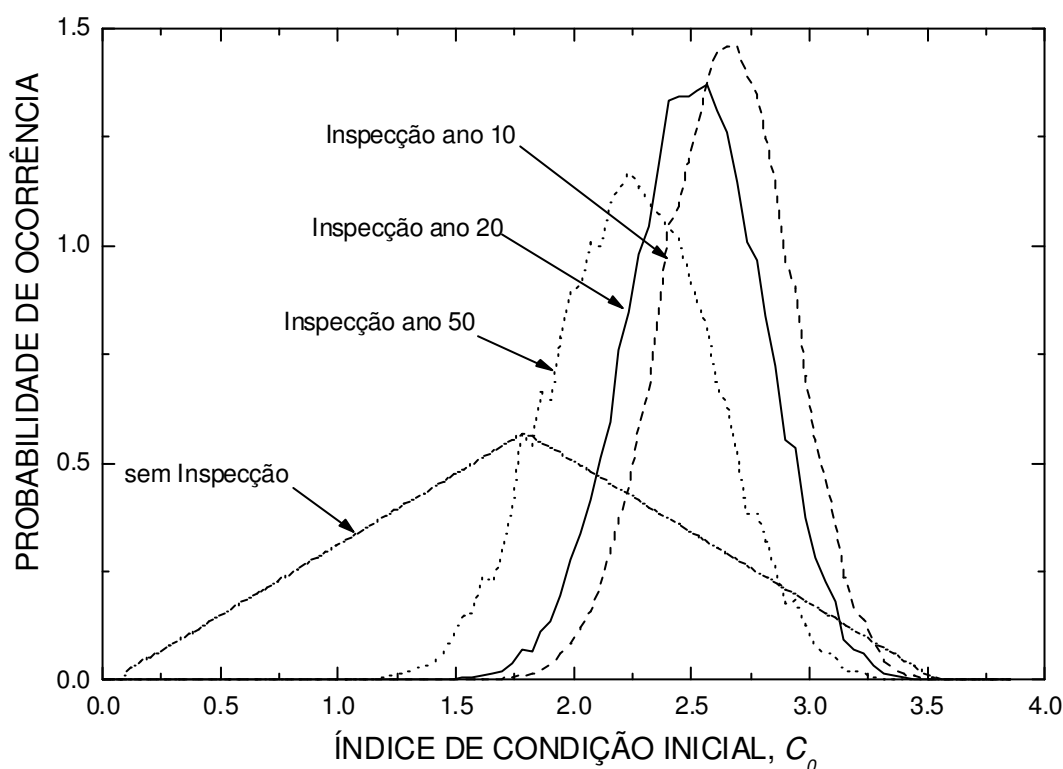


Figura 5.6: Histograma do índice de condição sob efeito do Silano para diferentes anos

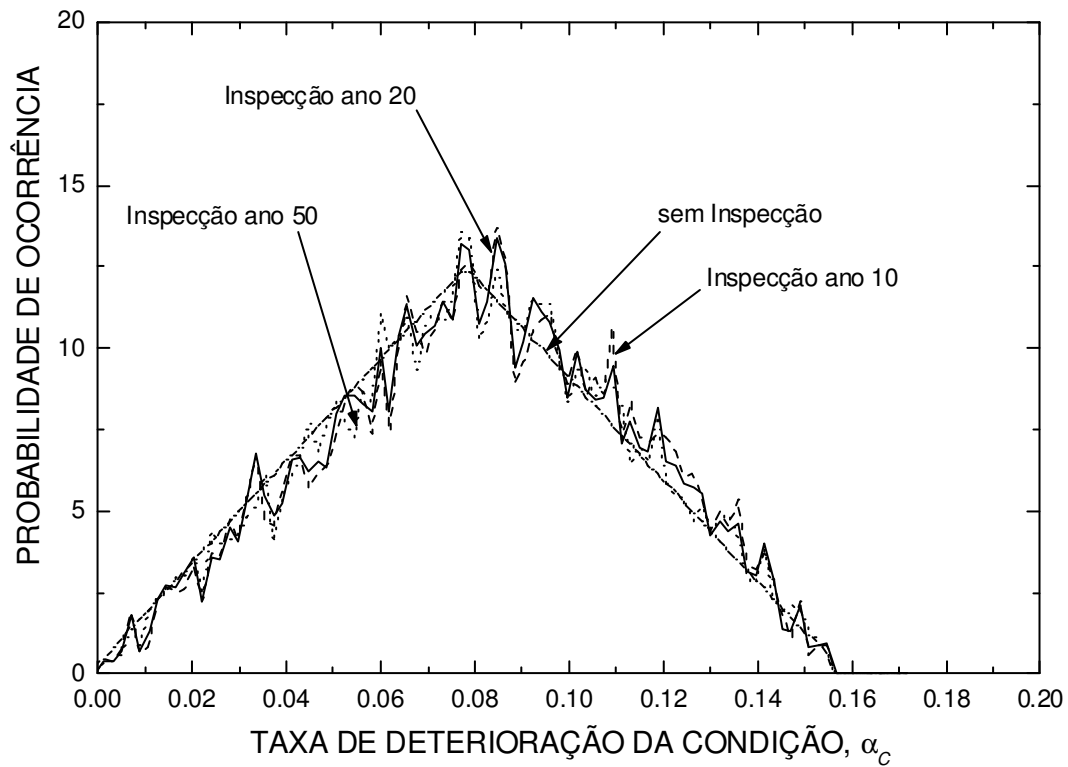


Figura 5.7: Histograma da taxa de deterioração para diferentes anos

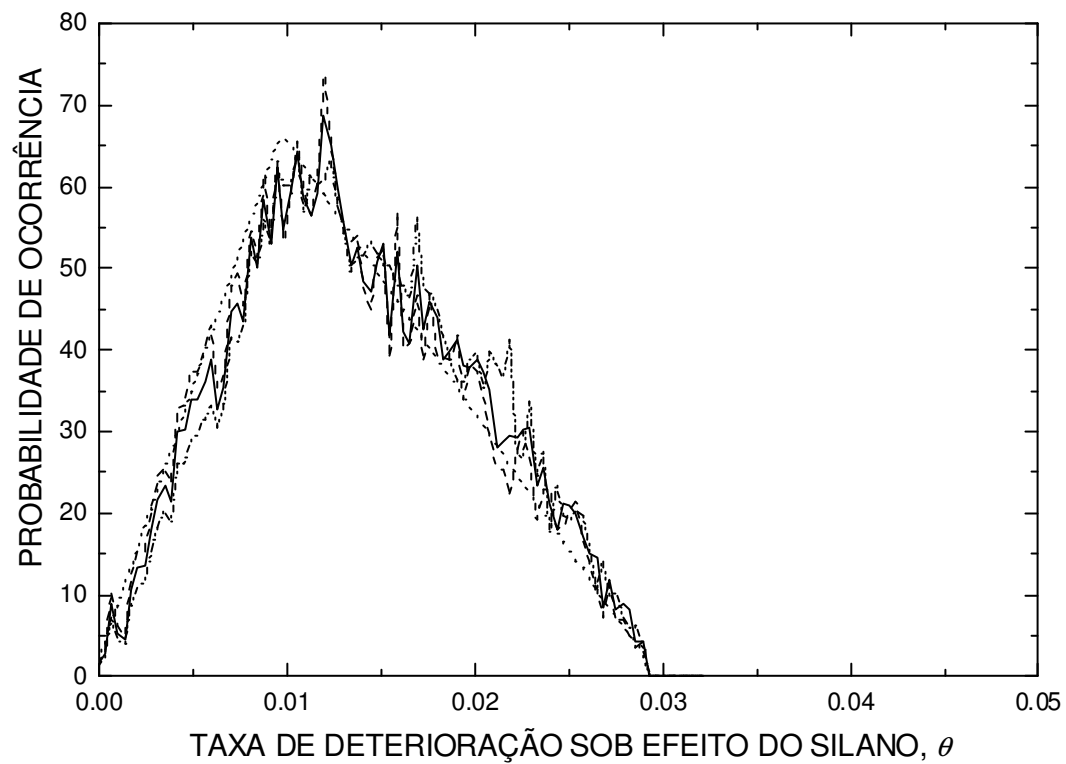


Figura 5.8: Histograma da taxa de deterioração sob o efeito do Silano para diferentes anos

### 5.3 Diferentes qualidades de inspecção

A qualidade da inspecção tem um papel fundamental na análise dos dados obtidos durante a inspecção

Assim sendo, são analisadas inspecções com diversas qualidades de inspecção, nomeadamente associadas a função de verossimilhança com um desvio padrão de 0.1, 0.255, 0.5, 0.75 e 0.90, e resultado  $C_{ins} = 3$ . Estes valores estão associados a probabilidades de classificação errada apresentados na Tabela 5.2. Considera-se a aplicação de uma acção de manutenção periódica, o Silano, que é aplicada de 3.5 em 3.5 anos.

A probabilidade dos resultados das inspecções serem errados, corresponde ao facto de a condição ser inferior a 2.5 ou superior a 3.5 ( $P(C < 2.5 \cup C > 3.5)$ ), como se pode ver na Tabela 4.2 na secção 4.5.

Na Figura 5.9 apresentam-se a média e o desvio padrão considerando várias qualidades de inspecção. Verifica-se que quanto melhor é a qualidade (menor desvio padrão) maior é a média, e menor é o desvio padrão. De facto, como já foi referido na secção 4.5, a actualização bayesiana considera que a distribuição *à posteriori* é uma média ponderada da verossimilhança e de distribuição *à priori*, sendo os factores de ponderação os desvios padrões de cada uma destas distribuições. Assim, um pequeno desvio padrão da verossimilhança faz tender os resultados para esta. Verifica-se também que mesmo através de uma inspecção de má qualidade (desvio padrão igual à 1) se pode obter uma significativa melhoria da previsão do desempenho.

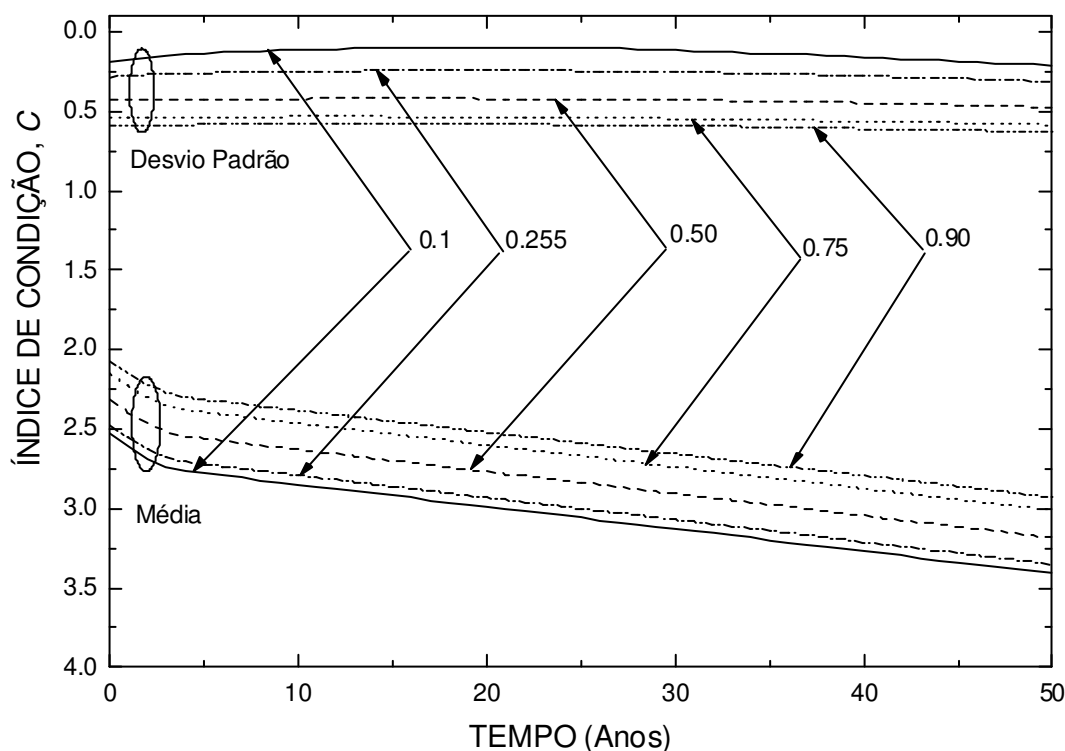


Figura 5.9: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades

Concluindo, através das inspecções obtêm-se dados mais precisos que permitem determinar se a acção de manutenção em estudo é adequada ou não. Todas as inspecções permitem concluir que o índice de deterioração é superior ao índice de deterioração determinado nos dados sem inspecção. As inspecções permitem alterar a acção de manutenção de modo a diminuir a deterioração.

De modo a melhor perceber a influência do desvio padrão nas inspecções, são analisados com mais pormenor duas variáveis que caracterizam o índice de condição, nomeadamente o índice de condição inicial e a taxa de deterioração da condição.

Na Figura 5.10 e 5.11 estão apresentados o índice de condição inicial e a taxa de deterioração. Na Figura 5.10 observa-se que quanto melhor é a qualidade da inspecção menor é a variância.

Na Figura 5.11, observa-se a taxa de deterioração da condição é igual para todas as inspecções, tal como descrito na secção anterior.

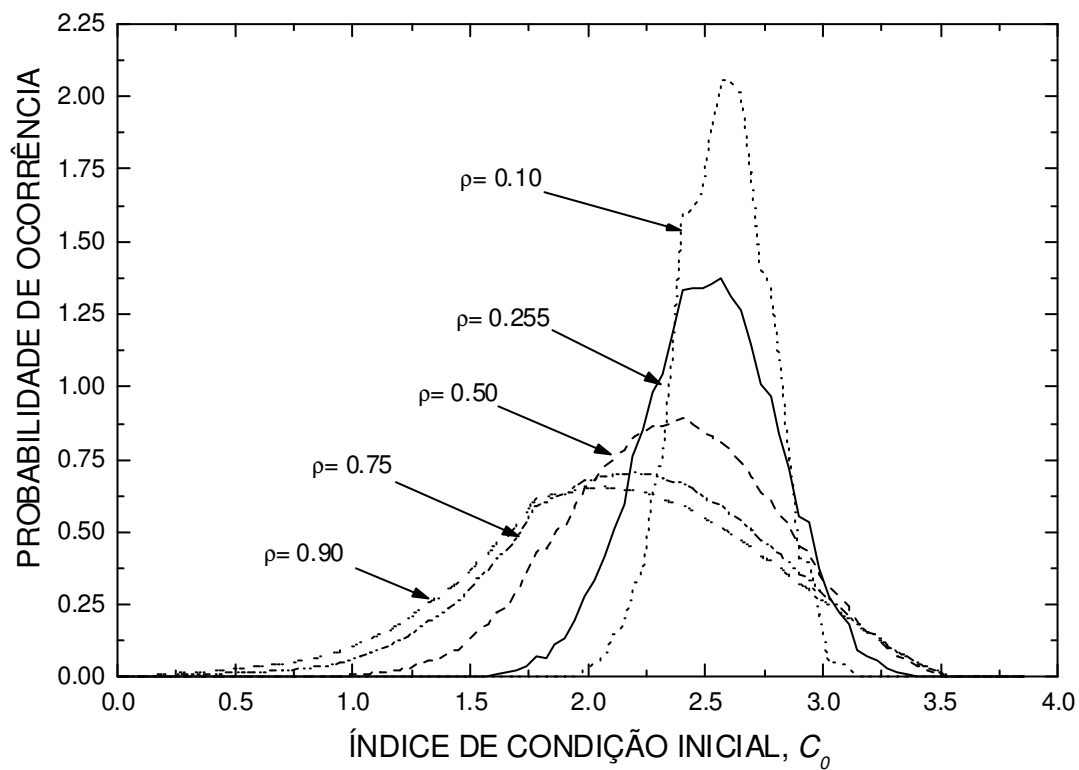


Figura 5.10: Histograma do índice da condição com diferentes qualidades

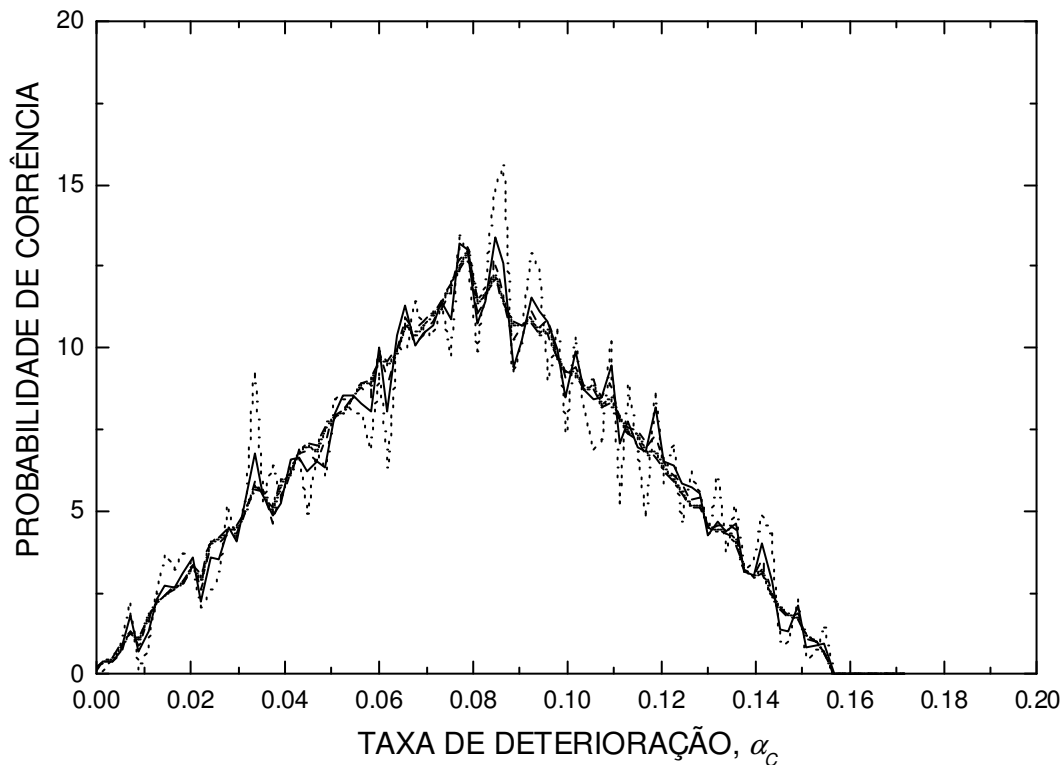


Figura 5.11: Histograma da taxa de deterioração da condição com diferentes qualidades

#### 5.4 Comparação de inspecções

Ao longo deste capítulo considerou-se o resultado da inspecção é independentemente do instante de realização.

Desse modo, nesta secção são comparados resultados assumindo que o valor obtido na inspecção é próximo do percentil 75 do índice de condição sem inspecção.

Assim sendo, os resultados das inspecções considerados são  $C_{ins} = 1.49$  no ano 7,  $C_{ins} = 1.75$  no ano 25 e por fim  $C_{ins} = 2$  no ano 47. Considera-se, para todas as inspecções, um desvio padrão de 0.255, e são efectuadas 50000 simulações para um período de 50 anos. Considera-se uma acção de manutenção periódica, o Silano.

Na Figura 5.12 apresenta-se a média e o desvio padrão de três inspecções associadas a resultados com uma probabilidade de 75% ser excedido. Como se observa, as médias das três inspecções estão sobrepostas. Observam-se grandes diferenças no desvio padrão porque as inspecções se realizam em instantes diferentes. De facto, quanto mais tarde se realiza a inspecção, maior é o desvio padrão no início até ao ano 10, sendo que a partir desse ano a situação inverte-se.

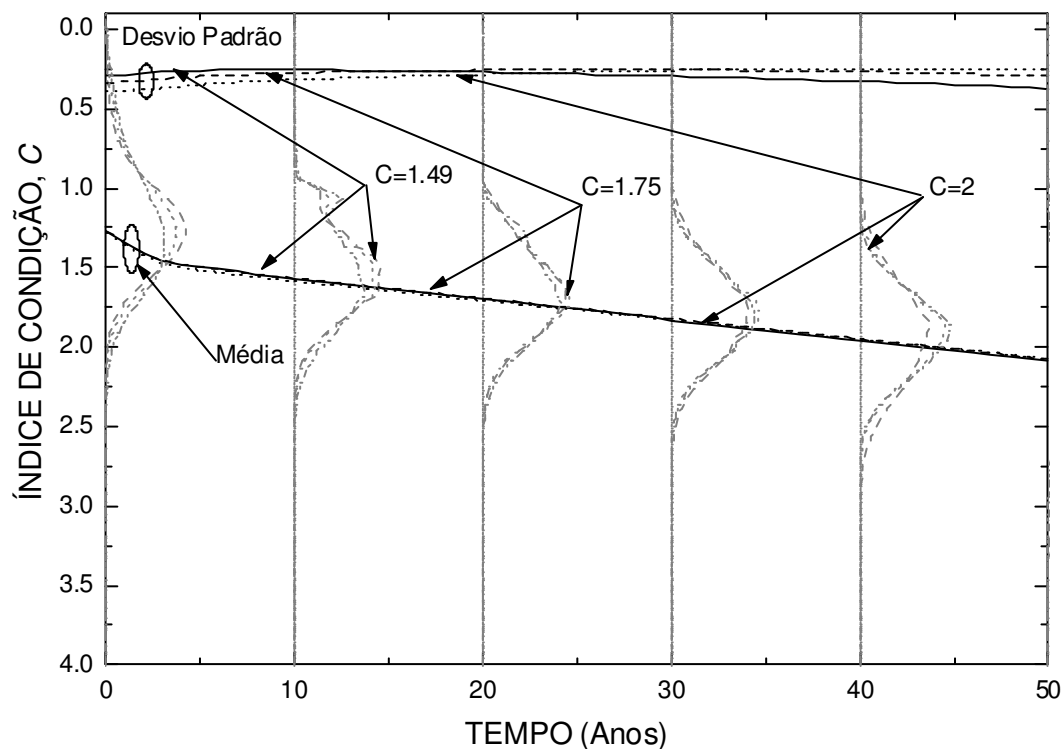


Figura 5.12: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

No que diz respeito ao índice de segurança, não se observa nenhuma diferença com e sem a realização de uma inspeção. Como foi referido anteriormente, não existe nenhuma correlação entre o índice de condição e o índice de segurança e, consequentemente, não se observa nenhuma alteração no índice de segurança e na taxa de deterioração da segurança.

Na Figura 5.13 e 5.14 apresentam-se os histogramas do índice de condição inicial e a taxa de deterioração, respectivamente. Como se observa na Figura 5.13, o índice de condição inicial tem uma distribuição triangular, ao contrário dos resultados associados à realização de inspeções. Observa-se que quanto mais cedo se realiza a inspeção menor é o intervalo dos valores, e consequentemente menor a dispersão.

Na Figura 5.14 apresenta-se o histograma da taxa de deterioração. Verifica-se que as taxas de deterioração são semelhantes para as três inspeções e sem a realização desta. De facto, a acção de manutenção é aplicada de 3.5 em 3.5 anos e tem um efeito de 7.5 anos. Deste modo, a taxa de deterioração da estrutura corresponde à taxa de deterioração sob o efeito do Silano.

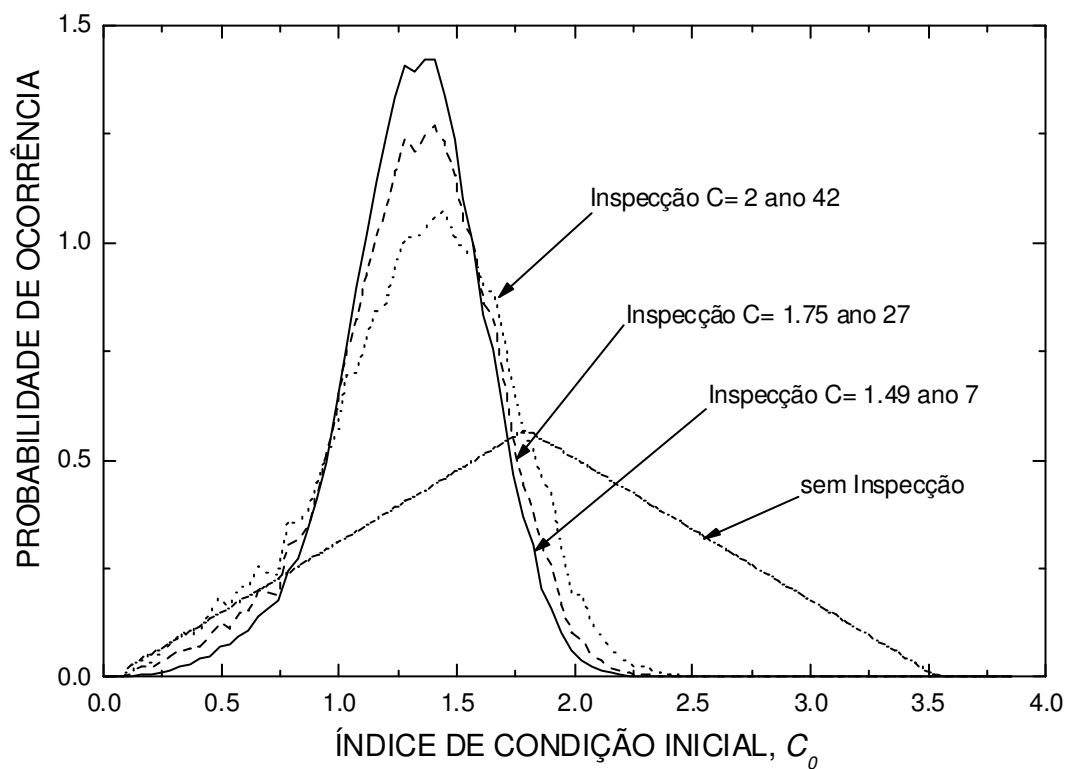


Figura 5.13: Histograma do índice de condição inicial para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

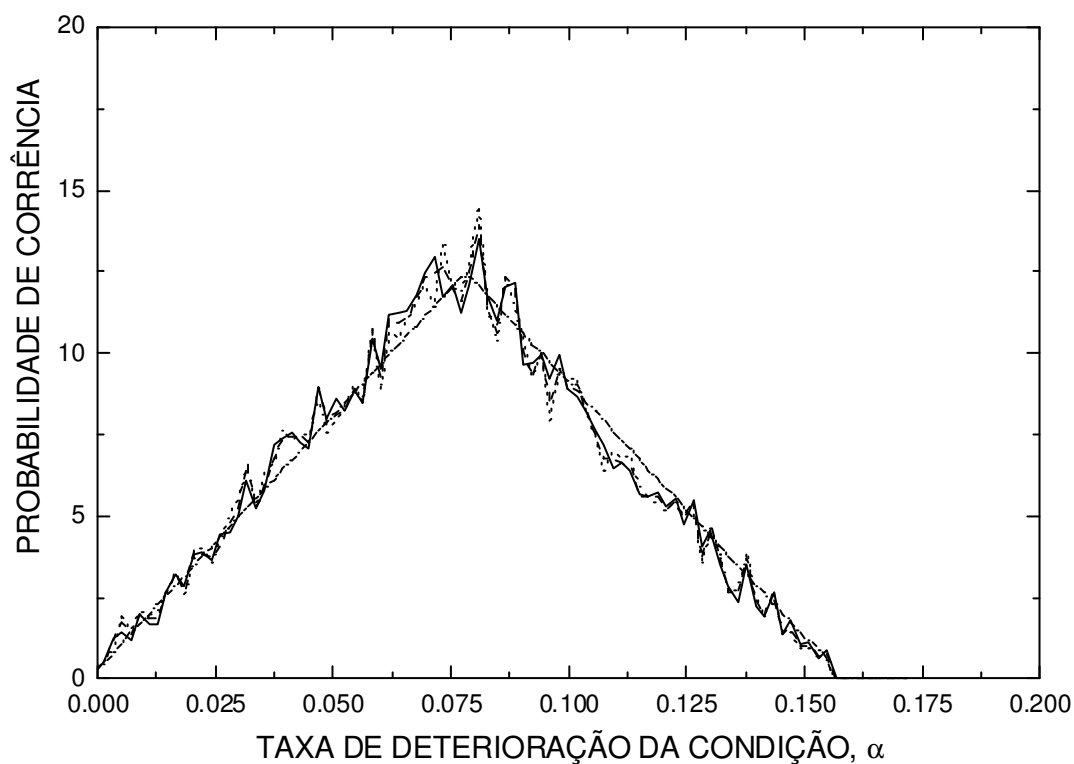


Figura 5.14: Histograma da taxa de deterioração da condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%



## 5.5 Conclusão

No presente capítulo foi analisado o efeito das acções de inspecção na previsão do desempenho de estruturas existentes sob efeito de acção de manutenção. Dos resultados obtidos pode concluir-se que a inspecção tem uma grande influência na estrutura, embora menor que a observada nos exemplos anteriores. De facto, a acção de manutenção é aplicada a intervalos de 3.5 e o seu efeito tem uma duração de 7.5 anos e, consequentemente, a sua taxa de deterioração é muito pequena, resultando numa grande redução do desvio padrão do desempenho.

Verifica-se ainda que quanto mais cedo se realiza a inspecção, mais conhecimento se obtém sobre o valor inicial da condição. No entanto, inspecções mais tardias introduzem pouca informação quanto à taxa de deterioração (já que esta não influencia o desempenho) e quanto à taxa de deterioração sob efeito do Silano (já que esta tem um pequeno desvio padrão).



## 6 Deterioração não linear

### 6.1 Introdução

No presente capítulo são analisadas estruturas cuja deterioração pode ser analisada considerando o modelo não-linear apresentado na secção 2.2.4.

Os dados são da autoria de Beek *et al.* (2002) e descrevem a deterioração de tabuleiros de pontes da Holanda. São efectuadas 50000 simulações para um período de 80 anos.

### 6.2 Análise do desempenho sem acção de manutenção

Considera-se nesta secção que não é aplicada nenhuma acção de manutenção, e que a deterioração é não linear. O índice da condição é considerado como a percentagem de área do tabuleiro que apresenta corrosão visível. Para as novas estruturas que são analisadas neste exemplo, a deterioração é 0 no ano 0. A deterioração do índice da condição tem uma distribuição logaritmo normal, com média de  $5.142 \cdot 10^{-4}$  (%/ano<sup>2</sup>) e um desvio padrão de  $1.107 \times 10^{-3}$  (%/ano<sup>2</sup>). O índice da segurança inicial tem valor de 3.6 e é considerado determinístico. A taxa de deterioração da segurança é considerada assumindo uma redução de 25% no índice de segurança ao longo dos 80 anos (Neves, 2005).

Na Figura 6.1 apresenta-se a média e o desvio padrão sem acção de manutenção. Observa-se que nos 10 primeiros anos da vida da estrutura, não existe nenhuma deterioração. A partir do ano 10, a média aumenta parabolicamente, assim como o desvio padrão. O facto de a média aumentar parabolicamente, implica que a taxa de deterioração aumenta significativamente ao longo do tempo. O valor limite média da condição,  $C_T = 3$ , é atingido no ano 76.

No que diz respeito ao índice da segurança, observa-se na Figura 6.2 que a média e o desvio padrão são, como no caso da condição, constantes nos 10 primeiros anos da vida útil da estrutura, e de valor igual à 3.5. A partir do ano 10, a média do índice de segurança tem uma inclinação de  $2 \times 10^{-5}$  (%/ano<sup>2</sup>) representando a taxa média de deterioração. A média do índice de segurança e o desvio padrão são lineares ao longo da vida útil da estrutura.

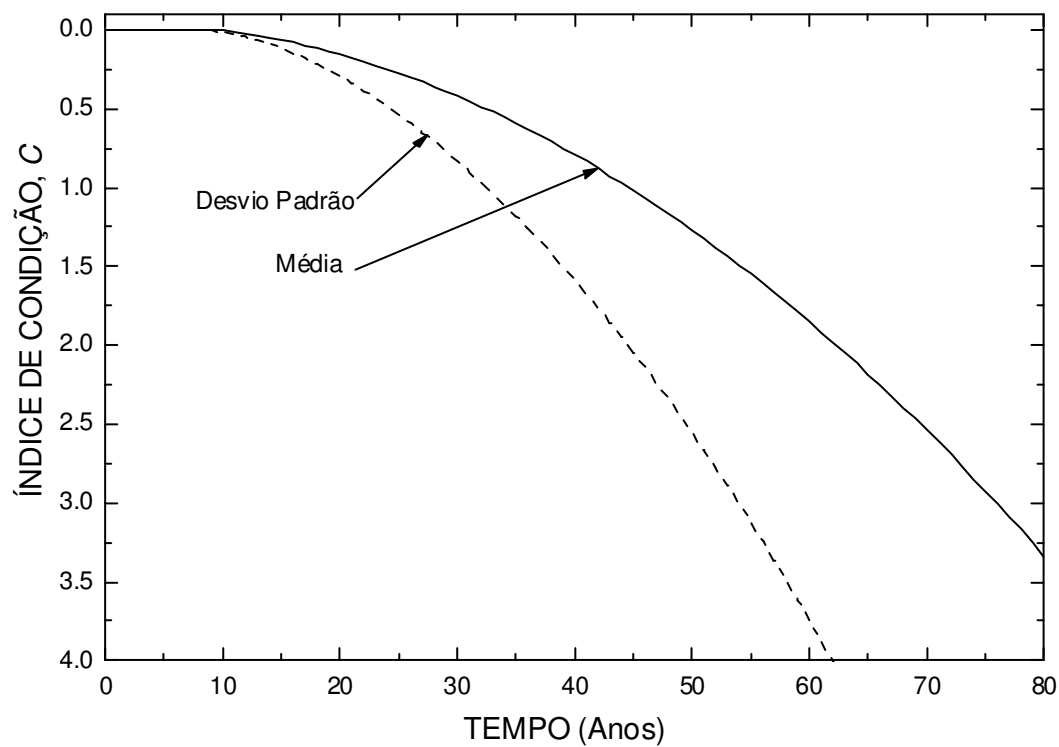


Figura 6.1: Média e desvio padrão do índice de condição sem acção de manutenção

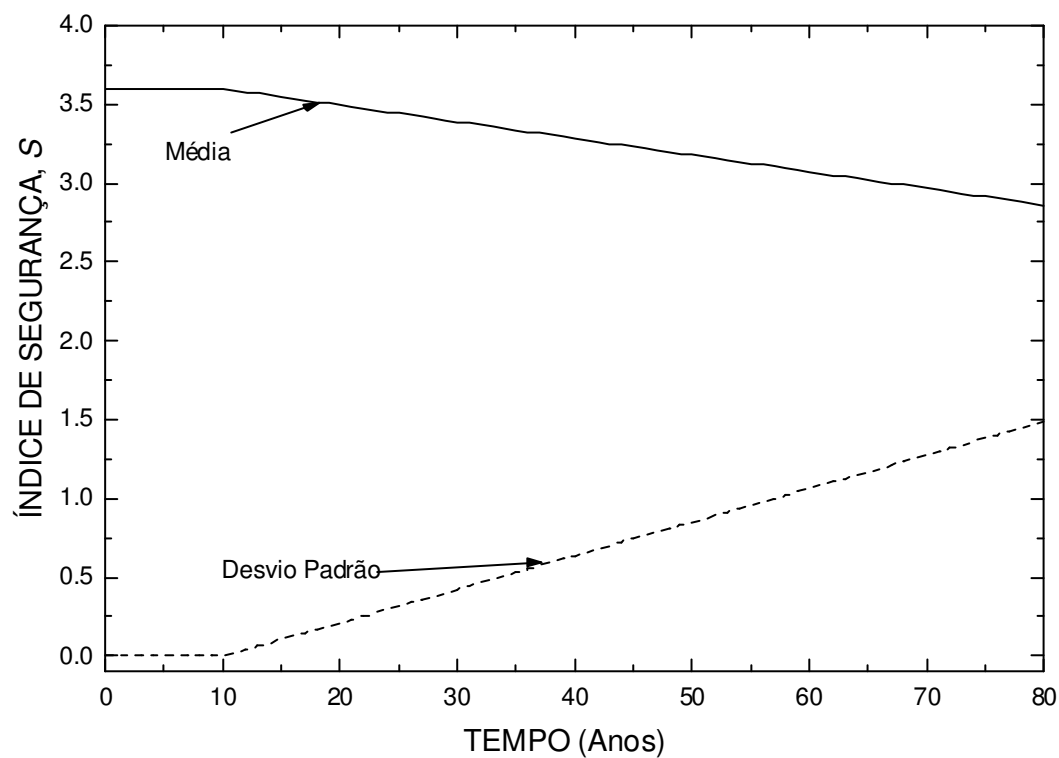


Figura 6.2: Média e desvio padrão do índice de segurança sem acção de manutenção

## 6.3 Inspeção

Uma inspecção permite observar o estado de uma estrutura num determinado instante, verificar se a acção de manutenção é adequada e, no caso de ser necessário, alterar essa mesma acção de manutenção.

Para além disso, a inspecção permite recolher dados importantes sobre os parâmetros que definem o índice da condição e o índice de segurança.

No entanto, as inspecções apenas permitem ver qual o condição da estrutura, e não recolhem nenhuns dados precisos sobre a segurança, tendo em conta que não se efectuam ensaios ou análises estruturais.

### 6.3.1 Inspeção alterando o ano da inspecção

Como se verificou no capítulo da inspecção referente a uma deterioração linear, o ano da realização da inspecção é determinante na informação que se pode obter a partir de uma inspecção.

De seguida é apresentada a análise de uma inspecção realizada em diferentes instantes, considerando sempre um valor médio de  $C_{ins} = 3$  e um desvio padrão de 0.255. As inspecções são realizadas no ano 20, 30, 40 e 50, e são analisados em conjunto com os resultados sem inspecção.

A análise é efectuada para um período de 80 anos e são efectuadas 50000 simulações. O valor assumido para o resultado da inspecção é bastante maior que o inicialmente previsto. Assim os resultados considerando inspecção estarão associados a uma maior deterioração e pior desempenho.

Considera-se que o índice de condição e de segurança são caracterizados pelos parâmetros apresentados na Tabela 6.1. Os índices de condição e de segurança iniciais são caracterizados por uma distribuição triangular, enquanto as taxas de deterioração são caracterizadas por distribuições lognormais caracterizadas pela média e desvio padrão.

Tabela 6.1: Propriedades dos parâmetros associados à condição e à segurança

Índice de Condição			Índice de Segurança		
Índice inicial $C_o$	Início de deterioração $T_{ic}(ano)$	Taxa de deterioração $\alpha_c$	Índice inicial $S_o$	Início de deterioração $T_i(ano)$	Taxa de deterioração $\alpha$
0	0	$5.142 \times 10^{-4}$	0.91	0	$1.029 \times 10^{-2}$
1.75		$1.107 \times 10^{-3}$	1.50		$2.221 \times 10^{-2}$
3.5			2.50		

(Nota: Os índices de condição e de segurança têm uma distribuição triangular, as taxas de deterioração são caracterizadas pela média e desvio padrão.)

Na Figura 6.3, apresenta-se a média e desvio padrão da condição considerando uma inspecção realizada em diferentes instantes. Observa-se que, quanto mais cedo se realiza a inspecção, maior é o índice de condição inicial e maior diferença apresenta relativamente ao valor inicialmente previsto. O valor limite da condição  $C_T=3$  é atingido próximo do ano em que se realiza a inspecção. Verifica-se que através da inspecção do ano 20, obtém-se um valor mais parecido da condição inicial, e através da inspecção do ano 50 obtém-se uma taxa de deterioração mais próxima da realidade.

Em relação ao desvio padrão, observa-se que aumenta quanto mais tarde é efectuada a inspecção. O valor mínimo do desvio padrão é próximo de 0.255, que corresponde ao desvio padrão da função de verossimilhança, sendo atingido próximo do ano em que se realiza a inspecção.

No que diz respeito ao índice de segurança, não se verifica nenhuma diferença por não existir nenhuma correlação entre o índice de segurança e de condição.

Ao longo da análise verificou-se, que se se assumir sempre o mesmo resultado para a inspecção, quanto mais tarde se realiza a inspecção menor é a média da condição, e menor é a taxa de deterioração ao longo dos anos.

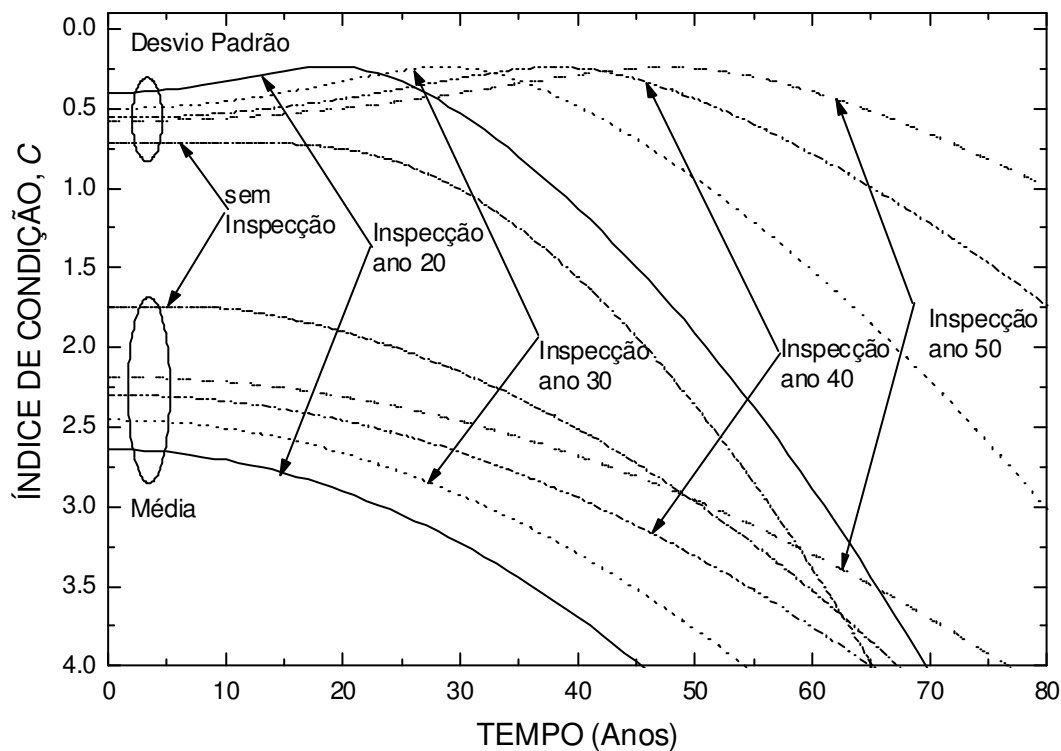


Figura 6.3: Comparação da média e desvio padrão do índice da segurança considerando diferentes instantes de inspeção

### 6.3.2 Inspeções com diferentes qualidades

No presente secção é analisado o efeito das inspeções considerando diferentes níveis de qualidade. Como foi referido nas secções 4.5 e 5.3, a qualidade da inspeção é muito importante na definição dos resultados.

Assim sendo é considerada uma inspeção associada a desvio padrão de 0.255, 0.5, 0.75 e 1, isto é, de uma inspeção de boa qualidade (0.255) a uma inspeção de muito má qualidade (1). Todas as inspeções são realizadas no ano 20 e resultado  $C_{ins} = 3$ .

Na Figura 6.4 apresenta-se a média e desvio padrão do índice de condição considerando inspeções com várias qualidades. Observa-se que a média aumenta conforme aumenta a qualidade da inspeção, associada a um menor desvio padrão. O valor limite da condição,  $C_T = 3$ , é atingido mais tarde, quanto pior é a inspeção. Verifica-se que, mesmo uma inspeção de má qualidade (desvio padrão igual a 1) tem uma média superior à mesma sem inspeção, e que o desvio padrão da pior inspeção é inferior ao desvio padrão sem inspeção. Portanto apesar de a inspeção ser de má qualidade, sempre é possível obter informações sobre a estrutura. Observa-se também o valor mínimo do desvio padrão corresponde à inspeção de melhor qualidade e ocorre no ano em que esta se realiza.

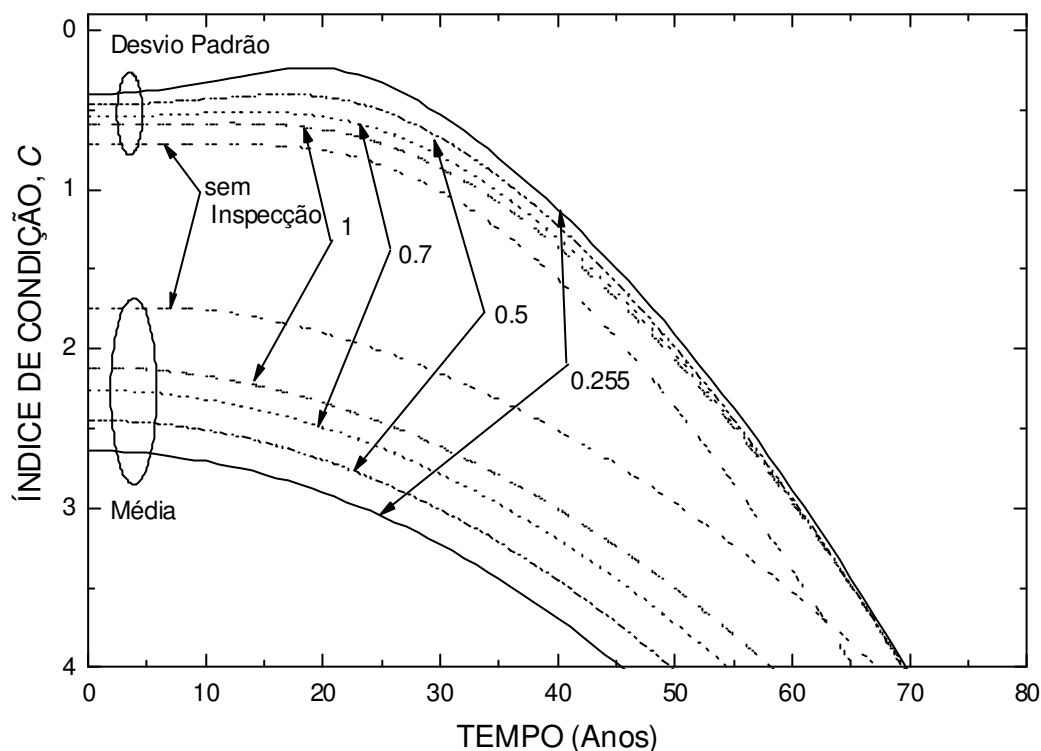


Figura 6.4: Média e desvio padrão do índice de condição com diferentes qualidades

Em relação ao índice de segurança, não se observa nenhuma alteração entre as diversas qualidades de inspeção.

### 6.3.3 Comparação de inspeções

Na secção que se segue são analisadas inspeções com um resultado com uma probabilidade de ser excedido de 75%. Desse modo são comparadas três inspeções com diferentes índices de condição, nomeadamente uma inspeção com resultado  $C_{ins} = 1.40$  no ano 20, uma inspeção com resultado  $C_{ins} = 1.65$  no ano 40 e uma inspeção com resultado  $C_{ins} = 2$  no ano 60. Todas as inspeções estão associadas a uma função de verossimilhança com desvio padrão de 0.255 e não se considera nenhuma acção de manutenção. Efectuam-se 50000 simulações para um período de 80 anos.

Na Figura 6.5, apresenta-se a média e o desvio padrão do índice de condição associado às diferentes inspeções. Observa-se que a inspeção  $C_{ins} = 1.40$  apresenta a maior alteração do índice de condição inicial. De facto, esta inspeção realiza-se muito cedo, no ano 20, o que possibilita retirar informação sobre o índice de condição inicial. Verifica-se que a inspeção  $C_{ins} = 2$ , apresenta a maior alteração em relação à taxa de deterioração da condição. De facto, como a inspeção se realiza muito tarde, é possível determinar com mais certeza a taxa de deterioração, porque a estrutura já teve tempo suficiente para se deteriorar. Na Tabela 6.2, apresenta-se uma comparação dos índices de condição inicial e as taxas de deterioração.



Tabela 6.2: Comparação do índice de condição inicial e taxa de deterioração

	Sem Inspeção	$C_{ins} = 1.40$	$C_{ins} = 1.65$	$C_{ins} = 2$
Índice de condição inicial ( $C_0$ )	1.75	1.32	1.38	1.52
Taxa de deterioração da condição ( $\alpha_c$ )	$5.142 \cdot 10^{-4}$	$3.22 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-4}$

Verifica-se na Tabela 6.2 que quanto menor é a média da inspeção (inspeção realizada mais cedo), menor é o índice de condição inicial. De facto, quanto mais cedo se realiza a inspeção, com mais probabilidade se pode determinar o índice de condição inicial. Por outro lado, quanto mais tarde se realiza a inspeção, mais o valor da condição inicial se aproxima do valor inicialmente previsto. O mesmo sucede com a taxa de deterioração: quanto mais tarde se realiza a inspeção, mais a estrutura se deteriorou e consequentemente, mais informação se obtém sobre a taxa de deterioração.

Em relação ao desvio padrão, verifica-se que este é menor quanto menor é a média da inspeção. De facto, quando a inspeção é realizada cedo, a taxa de deterioração com inspeção é próxima da taxa de deterioração inicialmente prevista, e assim o desvio padrão da condição aumenta muito significativamente por efeito do desvio padrão da taxa de deterioração. Observa-se também que o desvio padrão alcança o valor mínimo no ano em que se realiza a inspeção, e que o valor mínimo é igual à qualidade da inspeção.

No que diz respeito ao índice da segurança não se observa nenhuma diferença entre a realização de uma inspeção e sem a realização desta. De facto, os dados obtidos aquando a inspeção apenas afectam o índice da condição por não se realizar nenhuns ensaio ou análises estruturais.

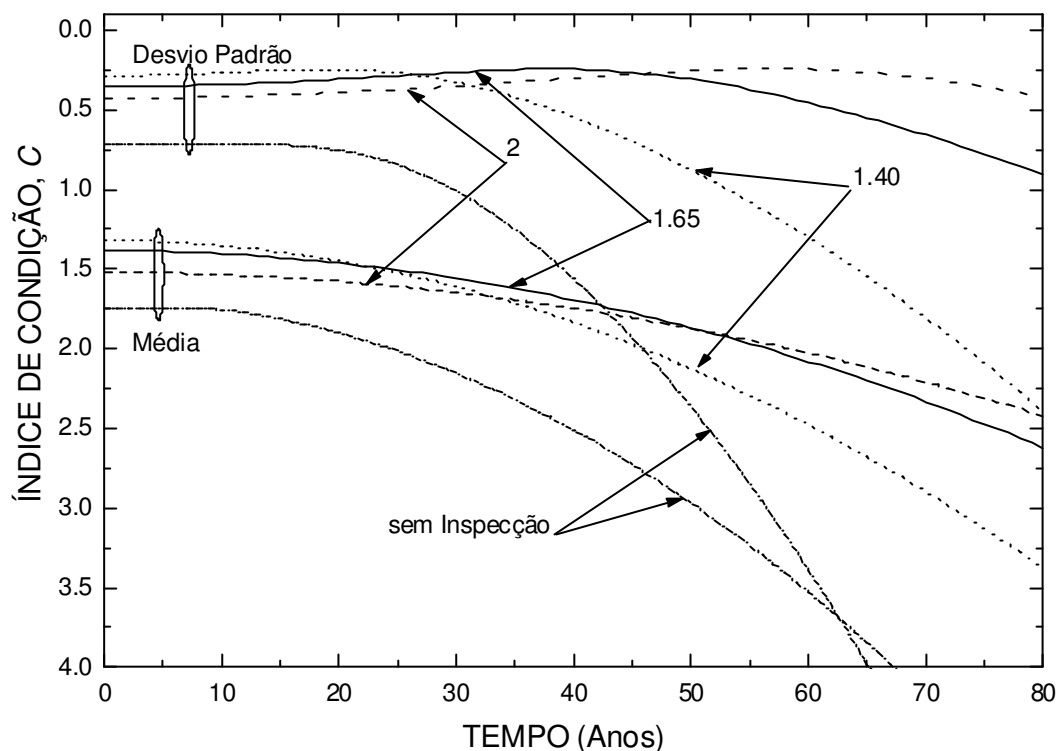


Figura 6.5: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

#### 6.3.4 Realização de duas inspeções

Até agora foi realizada apenas uma inspeção de modo a recolher novos dados sobre o estado da estrutura. Na presente secção estudam-se os resultados obtidos ao efectuar duas inspecções ao longo da vida útil da estrutura. Deste modo, foi efectuada uma inspecção no ano 20 e o ano 40 e uma inspecção no ano 20 e no ano 60. Os resultados das inspecções são diferentes, sendo de  $C_{ins} = 1.40$  para a inspecção do ano 20, de  $C_{ins} = 1.65$  para a inspecção do ano 40 e de  $C_{ins} = 2$  para a inspecção do ano 60. O desvio padrão das diversas inspecções é igual e corresponde a 0.255. Os dois conjuntos são comparados com uma inspecção no ano 20 com resultado  $C_{ins} = 1.40$ . Todas as inspecções têm uma probabilidade de ocorrência de 75%.

Verifica-se que, tendo todos os cenários uma inspecção no ano 20, os três conjuntos de resultados são muito próximos no início da vida da estrutura. A aplicação da uma segunda inspecção permite reduzir a incerteza no fim de vida da estrutura, sendo a redução tanto maior, quanto mais tarde se realiza a inspecção.

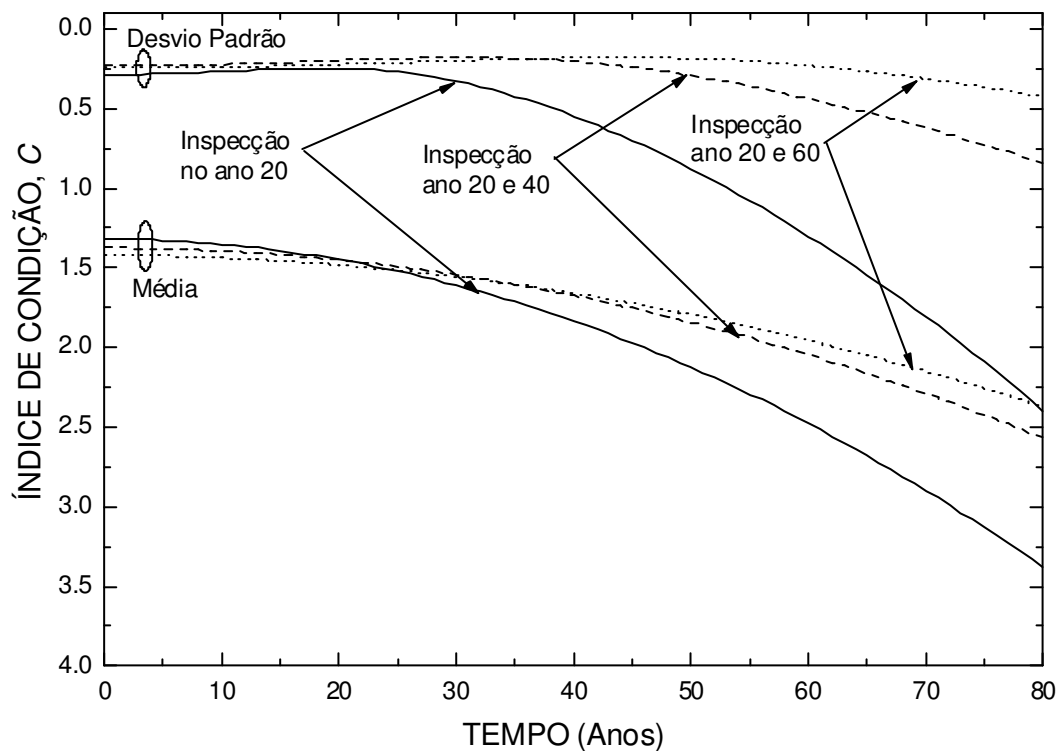


Figura 6.6: Média e desvio padrão do índice de condição para um resultado de inspeção com probabilidade de ser excedido igual a 75%

No que diz respeito à segurança, não se verifica nenhuma alteração com e sem a realização das inspeções por não existir nenhuma correlação entre o índice de condição e de segurança.

## 6.4 Conclusão

Ao longo do capítulo foram analisadas diversos instantes, qualidades e resultados de inspeções. Nos exemplos analisados, a previsão inicial é, em geral, optimista, tendo em conta o resultado assumido para a inspeção é superior à média prevista.

Conclui-se que uma inspeção muito cedo permite determinar com certeza o índice de condição inicial, e que uma inspeção realizada muito tarde permite determinar a taxa de deterioração. Conclui-se também que apesar de uma inspeção se realizar muito cedo, permite verificar se a previsão inicial era pessimista ou optimista através da condição inicial.

Constatou-se que o índice de segurança não é influenciado pela inspeção. De facto, a inspeção apenas influencia o índice de condição por não se realizarem ensaios ou análises estruturais.

Por fim, conclui-se que uma inspeção com melhor qualidade (menor desvio padrão) permite obter informações mais precisas sobre o índice de condição. No entanto, uma inspeção de pior qualidade (maior desvio padrão) permite de igual modo obter dados sobre a taxa de deterioração da estrutura.



## 7 Conclusões e Recomendações

Na presente tese, são combinados resultados de inspecção com modelos para análise de estruturas existentes ao longo da sua vida útil, considerando um índice de condição, obtido através de uma inspecção visual, e considerando um índice de segurança, obtido através da análise estrutural.

Após uma breve introdução aos modelos existentes, é analisado no capítulo 3, um modelo de deterioração com a aplicação de várias manutenções, nomeadamente uma acção de manutenção cíclica, uma acção de manutenção baseada no desempenho e uma acção de manutenção baseada no tempo e no desempenho, e são estudados os efeitos resultantes destas acções. Todos os parâmetros que definem os perfis sem manutenção, bem como os efeitos e os intervalos de aplicação das acções de manutenção estão definidos por variáveis aleatórias independentes ou correlacionadas. Os dados foram recolhidos por Denton (2002) em vários locais do Reino-Unido. Analisando os efeitos das acções de manutenção, verifica-se que as acções de manutenção baseadas no desempenho têm um maior impacto no índice da condição, e que tanto o índice da condição como o índice da segurança nunca ultrapassam o valor limite imposto. Verifica-se, de igual modo, que apesar dos dois índices estarem relacionados entre si, os efeitos da acção de manutenção não estão relacionados, isto é, as melhorias devidas à manutenção podem ter efeitos substancialmente diferentes para um e outro índice.

Nos capítulos 4 e 5 é analisado o impacto nas previsões de desempenho de inspecções. O resultado das inspecções é modelado como uma variável aleatória, de modo a incluir-se a incerteza existente. O efeito do instante de aplicação das acções e da sua qualidade é analisado para diferentes cenários.

Verifica-se que a qualidade da inspecção é importante na definição do desempenho: quanto melhor é a inspecção mais fiáveis são os resultados obtidos. Por fim foi analisada a correlação entre o índice de segurança e o índice da condição. Se não existir correlação, o resultado na inspecção não influencia a previsão da segurança. No entanto, quando se considera que existe correlação, o impacto da nova informação é relativamente grande.

Os efeitos de uma inspecção num modelo com uma acção de manutenção cíclica, o Silano, considerando anos diferentes da realização da inspecção, assim como com diferentes qualidades de inspecção.

No capítulo 6, o modelo é ampliado de modo a considerar deterioração não linear. O modelo em questão é baseado em dados obtidos por Gaal (2002) e Beek *et al.* (2003) na Holanda. Analisa-se o impacto nas previsões do desempenho de inspecções. Verifica-se que a qualidade da inspecção é importante: quanto melhor é a inspecção, mais fiáveis são os resultados.

A análise dos resultados obtidos mostram a importância capital da correlação entre o índice de condição e o índice de segurança das estruturas. Assim, ganha particular importância um conhecimento adequado, quer da evolução no tempo da segurança, quer da correlação entre

o índice de segurança e o índice de condição. Para isto é fundamental avaliar a estrutura considerando o comportamento estrutural e a sua evolução no tempo.

Verifica-se ainda que os perfis do índice de condição e de segurança utilizados foram calibrados para um conjunto relativamente pequeno de estruturas. Verificar a adequação destes modelos a grupos maiores de estruturas é fundamental para uma adequada gestão das pontes existentes.

Por último, o efeito das acções de manutenção foi definido apenas com base na opinião de peritos. Não existe informação de grandes conjuntos de intervenções que permitam avaliar correctamente o efeito de muitas das acções de manutenção correntes a longo prazo. A análise do desempenho das acções de manutenção é fundamental na avaliação, a longo prazo, do desempenho de estruturas existentes

## 8 Bibliografia

Aktan, A.E., Farhey, D.N., Brown, D.L., Dalal, V., Helmicki, A.J., Hunt, V.J., and Shelley, S.J. (1996): Condition assessment for bridge management. *Journal of Infrastructure System*, ASCE, 2 (3): 108-117.

Ang, A. e W. Tang (2007). *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications in Civil and Environmental*. Wiley.

ASCE. (2005). "Report Card of America's Infrastructure." American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Beek, A. v., Gaal, G. C. M., Noortwijk, J. M. v., and Bakker, J. D. (2003). "Validation model for service life prediction of concrete structures." *2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, Paris, 257-267.

Chase, S.B. and Washer, G. (1997). Non-destructive evaluation for bridge management in the next century. *Public Roads*, pages 16-25.

Cruz, P., Neves, L.C. e Wisniewski, D. *Segurança, Manutenção e Conservação de Pontes*, 18.01.2006, EP.

Das, P. C. (1998). "New developments in bridge management methodology." *Structural Engineering International, IABSE*, 8(4), 299-302.

de Brito, J., Branco, F. A., Thoft-Christensen, P., and Sorensen, J. D. (1997). "An expert system for concrete bridge management." *Engineering Structures*, 19(7), 519-526.

DB 21/01 (2001). *The assessment of Highway Bridges and Structures*. Highways agency standard for bridge assessment.

Denton, S. (2002). Data estimates for different maintenance options for reinforced concrete cross-heads. Draft report for Highways Agency, U.K., Brinckerhoff Ltd.

Faber,

Frangopol, D. M. (1998). "A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges." *Optimum Maintenance Strategies for Different Bridge Types*, London, U.K.

Frangopol, D. M., and Neves, L. A. C. (2003). "Life cycle maintenance strategies for deteriorating structures based on multiple probabilistic performance indicators." *ISEC-02 Second International Conference on Structural Engineering and Construction*, Rome.

Frangopol, D. M., and Neves, L. A. C. (2008). "Structural Performance Optimization with Conflicting Objectives under Uncertainty." *18th Analysis and Computation Specialty Conference*, Vancouver, Canada.

- Frangopol, D. M., Neves, L. A. C., and Petcherdchoo, A. (2004). "Health and safety of civil infrastructures: A unified approach." *Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures*, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Frangopol, D. M., and Neves, L. C. (2004). "Probabilistic maintenance and optimization strategies for deteriorating civil infrastructures." *Progress In Computational Structures Technology*, B. H. V. Topping and C. A. M. Soares, eds., Saxe-Coburg Publications, Stirling, Scotland.
- Frangopol, D. M., and Neves, L. C. (2006). "Life-cycle maintenance of structures by condition, reliability and cost oriented probabilistic optimization." *Innovation In Computational Structures Technology*, B. H. V. Topping, G. Montero, and R. Montenegro, eds., Saxe-Coburg Publications, Stirling, Scotland, 95-110.
- Hawk, H., and Small, E. P. (1998). "The BRIDGIT bridge management system." *Structural Engineering International, IABSE*, 8(4), 303-314.
- Koenig, C., Neves, L. C., and Frangopol, D. M. (2004). "Analysis of the lifetime deterioration of RC highway bridges with emphasis on condition, reliability, and cost." *CU/SR-04/5, Structural Engineering and Structural Mechanics Research Series*, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO.
- Kong, J. S. (2001). "Lifetime maintenance strategies for deteriorating structures," PhD thesis, University of Colorado, Boulder.
- Kong, J. S., Gharaibeh, E. S., and Frangopol, D. M. (2001). "Reliability-based life-cycle management of highway bridges." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 147-157.
- Lichtenstein, A. G. (1993). "The Silver Bridge collapse recounted." *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, 7(4), 249-261.
- Gaal, G. C. M. (2004). "Prediction of Deterioration of Concrete Bridges," PhD, Delft University, Delft.
- Melchers, R.E., *Structural Reliability Analysis and Prediction*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1999.
- McKay, M., Conover, W., and Beckman, R. (1979). "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code." *Technometrics*, 21(2), 239-245.
- Neves, L.C. (2008) Gestão de Pontes ao Longo da sua Vida Útil, em Engenharia e Vida, nº 46, pagina 54-58.
- Neves, L. A. C., and Frangopol, D. M. (2008). "Life-cycle performance of structures: combining experts judgment and results of inspection." *First International Symposium on Life-Cycle Engineering*, Varenna, Italy.



Neves, L. C., and Frangopol, D. M. (2005). "Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges." *Reliability Engineering and System Safety*, 89(2), 185-198.

Olsson, A., Sandberg, G., and Dahlblom, O. (2003). "On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis." *Structural Safety*, 25(1), 47-68.

Phares, B.M., Washer, G.A., Rolander, D.D., Graybeal, B.A. and Moore, M. "Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability". *Journal of Bridge Engineering*, 9:403, 2004.

Paulino, C., Turkman, M.A., Murteira, B., *Estatística Bayesiana*. Serviço da Educação e Bolsas Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Roelfstra, G., Hajdin, R., Adey, B., and Brühwiler, E. (2004). "Condition evolution in bridge management systems and corrosion induces deterioration." *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 9(3), 268-277.

Sommer, A.M., Nowak, A.S., and Thoft-Christensen, P. (1992). Probability-based bridge inspection strategy. *Journal of Structural Engineering*, 119 (12)

Thoft-Christensen, P. (1998). "Assessment of the reliability profiles for concrete bridges." *Engineering Structures*, 20(11), 1004-1009.

Thompson, P. D. (1993). "The Pontis Bridge Management System." *Pacific Rim TransTech Conference: International Ties, Management Systems, Propulsion Technology, Strategic Highway Research Program*, Seattle, 500-506.

